



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

BUDOVY PRO VZDĚLÁVÁNÍ - ENERGIE
A VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ

BUILDINGS FOR EDUCATION - ENERGY AND INDOOR ENVIRONMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Čišecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3608T001 Pozemní stavby
PRACOVISŤE	Ústav technických zařízení budov

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Ladislav Čišecký
NÁZEV	Budovy pro vzdělávání - energie a vnitřní prostředí
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....
doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.

Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Technická dokumentace areálu školy v Tibetu
2. Aktuální legislativa ČR a EU
3. České i zahraniční technické normy
4. Odborná literatura
5. Zdroje na internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Práce bude zpracována v souladu s platnými předpisy (zákony a vyhláškami, normami) pro energetické a environmentální hodnocení budov

- obsah a uspořádání práce dle směrnice FAST:

- a) titulní list,
- b) zadání VŠKP,
- c) licenční smlouva podepsaná autorem VŠKP,
- d) abstrakt v českém a anglickém jazyce, klíčová slova v českém a anglickém jazyce,
- e) bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690,
- f) prohlášení autora o původnosti práce, podpis autora,
- g) poděkování (nepovinné),
- h) obsah,
- i) úvod,
- j) vlastní text práce

A. Analýza tématu, cíle a metody řešení

Analýza zadaného tématu, normové a legislativní podklady

Cíl práce, zvolené metody řešení

Aktuální technická řešení v praxi

Teoretické řešení (s využitím fyzikální podstaty dějů)

Experimentální řešení (popis metody a přístrojové techniky)

Řešení využívající výpočetní techniku a modelování

B. Aplikace tématu na zadané budově

Zhodnocení stávajícího stavu stavby a jejích systémů, zhodnocení stavu vnitřního prostředí, ověření kvality vnitřního prostředí budovy, analýza užití energie z obnovitelných zdrojů, zhodnocení energetické, ekonomické a ekologické.

Hodnocení řešení se zaměřením na dosažení optimálního využití solární energie.

C1. Modelování a simulace

Modelové dílčí řešení s využitím softwaru postihující zadanou problematiku

- k) závěr,
- l) seznam použitých zdrojů,
- m) seznam použitých zkratk a symbolů,
- n) seznam příloh,
- o) přílohy – výkresy

Vše bude svázáno pevnou vazbou. Volné dokumenty (metadata, posudky, výsledky obhajoby) budou vloženy do kapsy na předních deskách, výkresy budou poskládány a uloženy jako příloha v kapse na zadní straně desek.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje hodnocení vnitřního prostředí školního komplexu v atypickém himalájském vysokohorském prostředí, který je zcela závislý na energiích pocházejících z obnovitelných zdrojů. Konstrukční řešení budov umožňuje maximální využití sluneční energie, které je jako jediné v oblasti dostatek. V práci jsou tyto budovy podrobně popsány. Rovněž je popsáno měření, které celoročně v objektech probíhalo. Výstupy z měření jsou porovnány s požadovanými hodnotami. Součástí práce jsou i matematické simulace na modelech vytvořených v software BSim. Výstupem simulací je pak hodnocení využití energie a návrh vhodných opatření na zlepšení stávajícího stavu.

KLÍČOVÁ SLOVA

sluneční energie, solární stěna, Ladakh, škola, internát, BSim, energetická simulace, solární komín

ABSTRACT

Diploma thesis deals with evaluation of indoor environment of a school complex in atypical Himalayan alpine environment which is totally dependent on energy originating from renewable sources. Structural design of buildings allows maximum utilization of solar energy which is the only one actually available source of energy in this area. The buildings are described in detail, as well as measurement conducted in buildings during the last year. The outcomes of measurements are compared with desired values. The thesis is also focused on mathematical simulations by using BSim software. The output of a building energy simulations is an energy use prediction and design of appropriate measures to improve the current situation.

KEYWORDS

solar energy, solar wall, Ladakh, school, hostel, BSim, energy simulation, solar chimney

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ladislav Čišecký *Budovy pro vzdělávání - energie a vnitřní prostředí*. Brno, 2017. 81 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

V Brně dne 10.1.2017

.....

podpis autora

Bc. Ladislav Čišecký

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu mojej diplomovej práce doc. Ing. Jiřímu Hiršovi, CSc. za odbornú pomoc a usmernenie pri písaní tejto práce, za cenné rady a informácie a v neposlednom rade za ochotu a čas, ktorý mi venoval. Veľká vďaka patrí ústavu TZB fakulty stavebnej VUT v Brně za to, že mi umožnil zúčastniť sa tohto projektu.

Mojej rodine, priateľom a známym ďakujem za morálnu a psychickú podporu.

V Brně dne 10.1.2016

.....

podpis autora

Ladislav Čišecký

Obsah

ÚVOD	- 10 -
1 ANALÝZA TÉMATU, CIELE PRÁCE	- 11 -
1.1 POPIS RIEŠENÝCH OBJEKTOV	- 11 -
1.1.1 Klimatické podmienky oblasti	- 11 -
1.1.2 Klimatické podmienky v ČR	- 12 -
1.1.3 Posudzované objekty	- 14 -
1.2 LEGISLATÍVA, POŽIADAVKY V ČR A OBLASTI KAŠMÍRU	- 19 -
1.2.1 Požiadavky na vnútorné prostredie v ČR	- 19 -
1.2.2 Požiadavky na vnútorné prostredie v Kašmíru	- 20 -
1.3 CIELE PRÁCE	- 21 -
2 METÓDY RIEŠENIA	- 22 -
2.1 EXPERIMENTÁLNE RIEŠENIE	- 22 -
2.1.1 Popis meracej techniky	- 22 -
2.1.2 Popis merania	- 23 -
2.2 RIEŠENIE VYUŽÍVAJÚCE VÝPOČTOVU TECHNIKU A MODELOVANIE	- 29 -
2.2.1 Matematický základ programu BSIm	- 31 -
Vedenie tepla v konštrukciách	- 31 -
Veľkosť časového kroku	- 34 -
Tepelná rovnováha vzduchu v zóne	- 35 -
Tepelné toky z vnútorných a vonkajších konštrukcií	- 35 -
Tepelné toky tepelnými mostami	- 35 -
Tepelné toky výplňami otvorov	- 36 -
Slnčná radiácia	- 36 -
Vzduch dopravovaný do zóny	- 37 -
Vplyv tepla od systémov	- 37 -
Celková tepelná rovnováha zóny	- 37 -
Spojenie prenosu tepla v konštrukciách a tepelnej bilancie zóny	- 38 -
Výpočet teploty skla	- 38 -
2.2.2 Popis tvorby modelov	- 39 -
Model budovy školy	- 39 -
Model školského internátu	- 40 -
3 HODNOTENIE NA ZÁKLADE MERANÍ	- 42 -
3.1 KLIMATICKÉ DATA	- 42 -
3.2 VNÚTORNÉ PROSTREDIE	- 44 -
3.2.1 Zimné obdobie	- 44 -
3.2.2 Letné obdobie	- 50 -
3.3 FÁZOVÝ POSUN V STENE	- 55 -
3.4 PRIEBEH TEPLÔT V ZÁCHODOCH	- 56 -
4 HODNOTENIE NA ZÁKLADE MODELOVANIA V PROGRAMU BSIM	- 58 -
4.1 BUDOVA ŠKOLY	- 58 -
4.1.1 Súčasný stav	- 58 -
4.1.2 Obsadenosť osobami	- 61 -
4.1.3 Výpočet potrebného výkonu zdroja tepla	- 63 -
4.2 BUDOVA ŠKOLSKÉHO INTERNÁTU	- 65 -
4.2.1 Súčasný stav	- 65 -
4.2.2 Obsadenosť osobami	- 68 -
4.2.3 Výpočet potrebného výkonu zdroja	- 70 -
4.2.4 Využitie tepla zo solárnej steny	- 72 -

5	ZÁVER	- 73 -
	Vyhodnotenie súčasného stavu.....	- 73 -
	Vyhodnotenie na základe simulácií.....	- 73 -
6	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	- 75 -
7	ZOZNAM TABULIEK	- 77 -
8	ZOZNAM OBRÁZKOV	- 78 -
9	ZOZNAM PRÍLOH.....	- 81 -

Úvod

V súčasnosti pozorujeme trend vytvárania čo najstabilnejšieho vnútorného prostredia. Máme prísne normy a každú malú odchýlku považujeme za neprijateľnú. Vo svete je však veľa miest, kde sa takéto prostredie považuje za luxus. V himalájskom vysokohorskom prostredí v oblasti zvanej Ladakh, kde je veľký nedostatok akýchkoľvek palív, je slnko jediným zdrojom energie, ktorej je dostatok. V zime tu teplota vnútorného vzduchu klesá až k bodu mrazu, pričom obyvatelia sú odkázaní na skromné podmienky. Miestni v tomto prostredí za podpory českých sponzorov vybudovali školský komplex celkom závislý na slnečnej energii. Hlavným motívom bola vidina kvalitnejšieho vzdelávania detí z tejto oblasti. Táto práca sa zaoberá hodnotením tohto komplexu z hľadiska vnútorného prostredia a využitia energie z obnoviteľných zdrojov. Pri hodnotení bolo potrebné pristupovať odlišne oproti zvyklostiam v Európe, nakoľko dosiahnuť zrovnateľné parametre je v danej lokalite nepredstaviteľné. Cieľom je teda dosiahnuť čo najlepšie parametre, ktoré však na rozdiel od našich zvyklostí nie sú dané legislatívne.

Táto práca je rozčlenená do štyroch tematických kapitol. V prvej kapitole sú popísané posudzované objekty. Sú tu uvedené skladby konštrukcií a princípy využívania solárnej energie. Taktiež sú tu popísané klimatické podmienky a požiadavky na vnútorné prostredie v oblasti. Tie sú potom porovnané s podmienkami v Česku.

Druhá kapitola je skôr teoretická a popisuje využité metódy pri posudzovaní budov. Priamo v budovách prebiehalo počas roka meranie a následne boli vytvorené matematické modely s využitím software BSim, na ktorých boli vykonané rôzne simulácie. V tejto kapitole je teda podrobne popísané meranie aj tvorba modelov. Taktiež je tu vysvetlený matematický základ programu BSim.

V tretej kapitole sú uvedené výsledky meraní. Je rozčlenená na podkapitoly, pričom každá podkapitola opisuje jeden objekt. Vyhodnotené sú aj namerané klimatické podmienky, ktoré sú porovnané s priemernými hodnotami uvedenými v prvej kapitole. Rovnako výsledky meraní budú porovnané s požiadavkami uvedenými na začiatku práce.

Štvrtá kapitola uvádza výsledky modelovania. Výstupom je simulácia prevádzkového stavu pri plnom obsadení osobami a taktiež návrh vhodných opatrení na zlepšenie nevyhovujúceho stavu. Výsledky modelovania sú porovnané s nameranými hodnotami a sú okrem iného zhodnotené aj z ekonomického hľadiska.

1 Analýza tématu, ciele práce

1.1 Popis riešených objektov

1.1.1 Klimatické podmienky oblasti

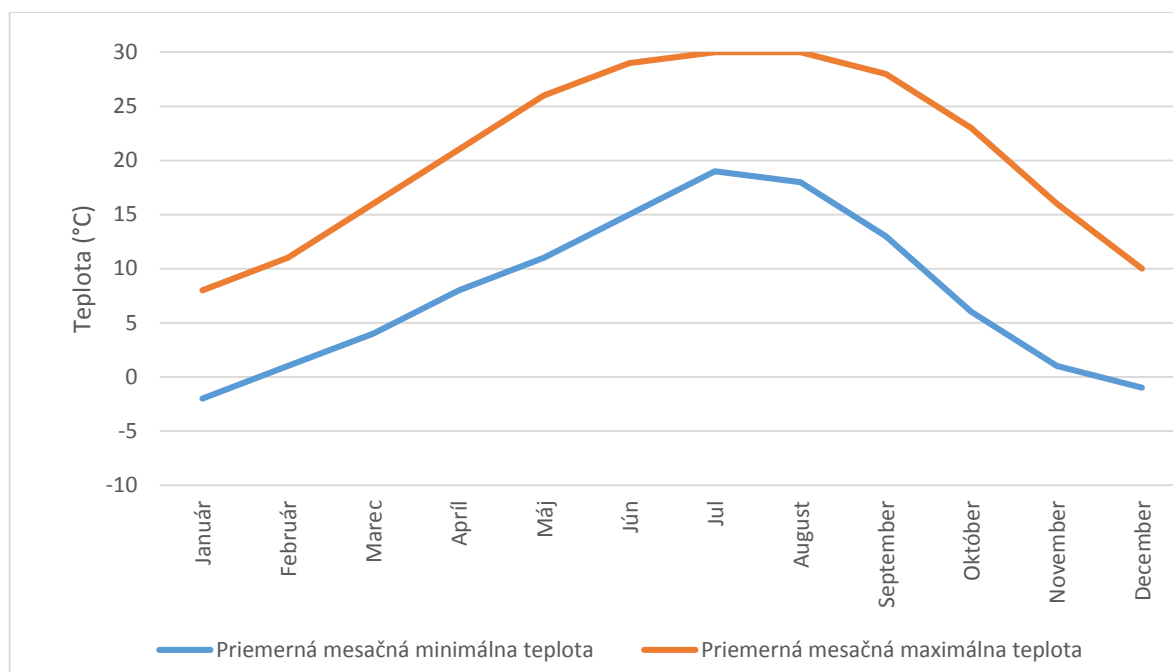
Úlohou tejto práce je zhodnotiť súčasný stav vnútorného prostredia školského areálu v himalájskom prostredí. Areál sa nachádza v dedine Mulbekh ležiacej v indickom štáte Džammú a Kašmír. Toto územie medzi štátmi India, Čína a Pakistan býva často označované pojmom „Malý Tibet“, pretože je to posledná oblasť s pôvodnou tibetskou kultúrou. Čínsko-indická hranica vytvorená v roku 1962 je stále predmetom sporov a oblasť bola pre turistov uzatvorená až do roku 1974.



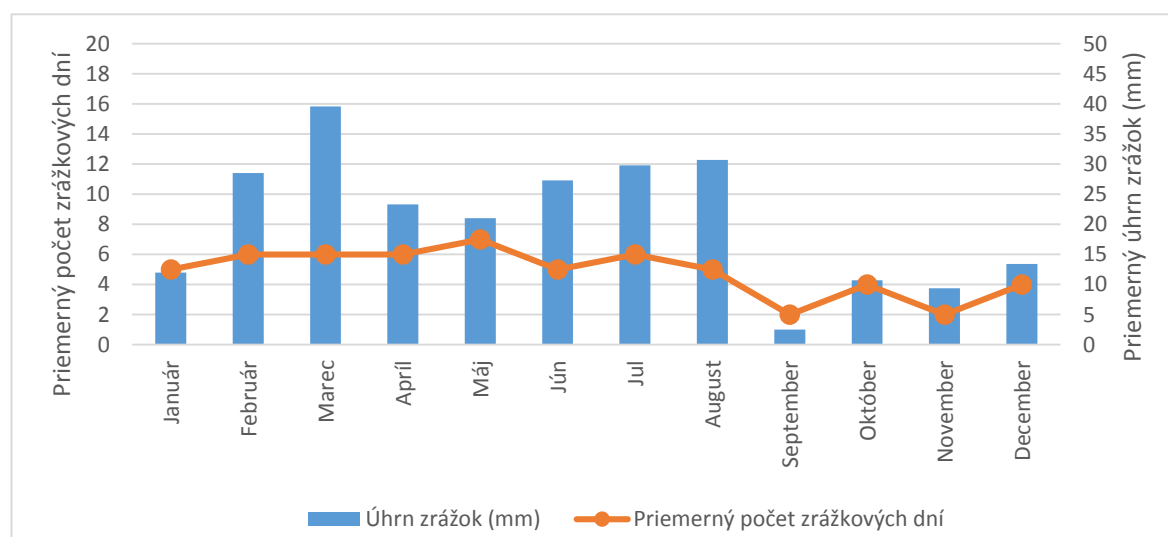
Obr. 1.1: Poloha dediny Mulbekh

Mulbekh leží v nadmorskej výške 3300 m n. m. a z hľadiska podnebia je oblasť ideálna pre využitie solárnej energie. Jedná sa o horskú púšť a v priemere je viac ako 300 dní v roku slnečných. Grafy na obr. 1.2 a obr. 1.3 sú prevzaté z [2] a jedná sa o dáta pre mesto Srinagar z obdobia od roku 2000 do roku 2012. Srinagar sa nachádza cca 100 km západne od dediny Mulbekh a tieto dáta tvoria zároveň okrajové podmienky pri vytváraní modelu v simulačnom riešení. Obr. 1.2 znázorňuje priemerné mesačné teploty v tomto období a obr. 1.3 znázorňuje priemerný mesačný úhrn zrážok a priemerný počet zrážkových dní.

Priemerná teplota sa pohybuje od $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ v zimnom období po $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ v letnom období, avšak v extrémoch môže teplota klesať až k $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Priemerný mesačný úhrn zrážok sa pohybuje v daždivých mesiacoch od 20 mm do 40 mm. V suchom období je to od 2 mm po 15 mm. Ročne v oblasti napadne v priemere 15 cm až 1 m snehu. Z obr. 1.3. vidieť, že najmenej zrážok spadne práve v zimnom období. Táto skutočnosť je veľmi podstatná, nakoľko riešené objekty využívajú solárnu energiu najmä v zimnom období. V lete je naopak potrebné zabrániť nadmernému zvyšovaniu vnútornej teploty a solárna energia je využívaná len na ohrev teplej vody, výrobu elektrickej energie a posilnenie prirodzeného vetrania pomocou solárneho komína.



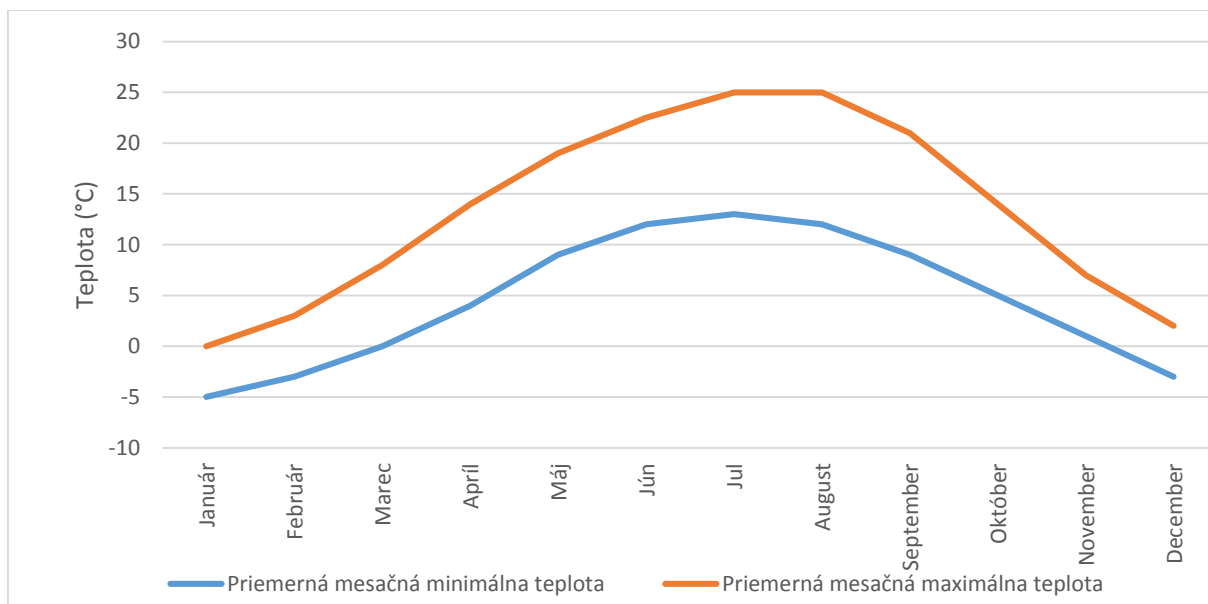
Obr. 1.2: Priemerné mesačné teploty pre mesto Srinagar



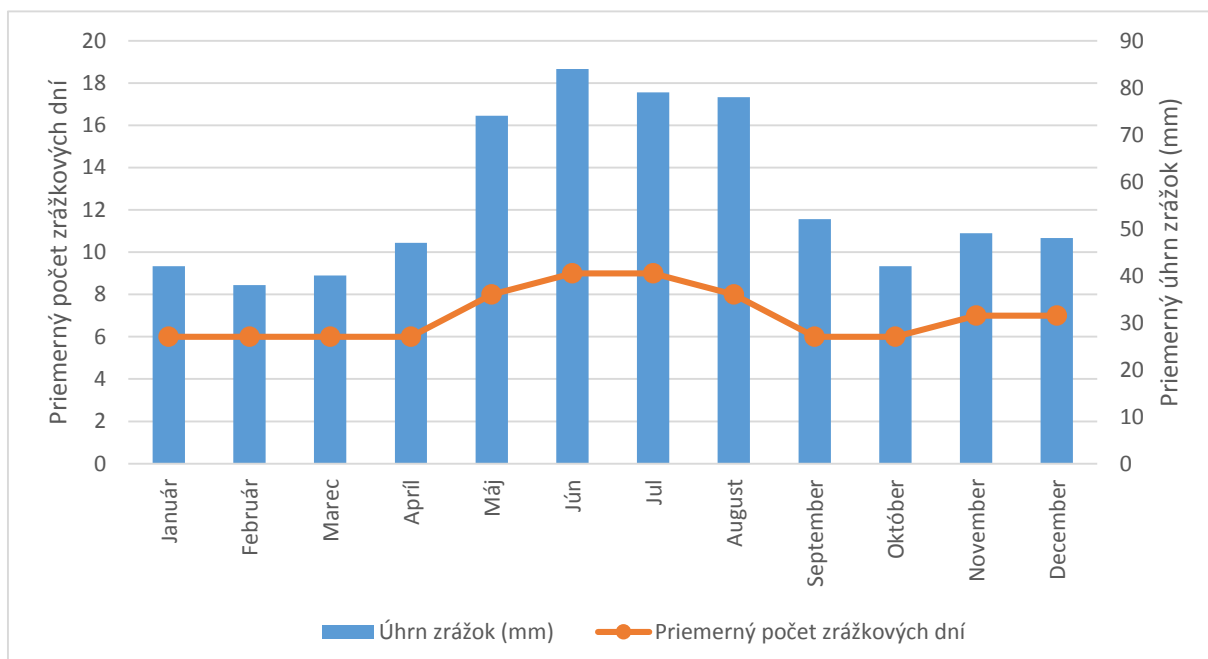
Obr. 1.3: Priemerný mesačný úhrn zrážok a počet zrážkových dní, Srinagar

1.1.2 Klimatické podmienky v ČR

Grafy uvedené v obr. 1.4 a 1.5 ako aj ostatné informácie v tejto kapitole vychádzajú z dát Českého hydrometeorologického ústavu [3]. Grafy znázorňujú dlhodobé priemerné hodnoty pre celú Českú republiku za roky 1961 až 1990. Podnebie v ČR sa vyznačuje vzájomným prenikaním a miešaním kontinentálnych a oceánskych vplyvov. To spôsobuje vyšší počet zrážok (viď obr. 1.5) a taktiež nižší počet slnečných dní. Podľa [3] je dlhodobý priemerný počet dní bez oblačnosti v ČR len 40 dní za rok. Priemerná teplota sa pohybuje od -5°C v zimnom období po $+25^{\circ}\text{C}$ v letnom období. Teploty sú porovnateľné s teplotami v himalájskom prostredí, v zimnom období sú nepatrne nižšie. Je to dané hlavne vyššou zrážkovou činnosťou u nás – ročný úhrn zrážok je v porovnaní s územím Kašmíru viac ako trojnásobný.



Obr. 1.4: Priemerné mesačné teploty pre ČR



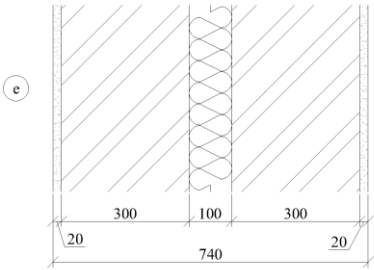
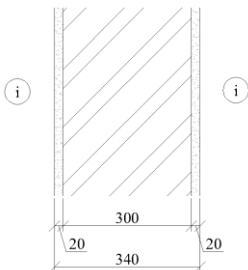
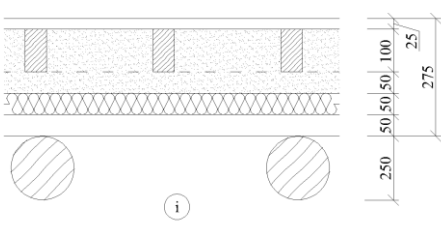
Obr. 1.5: Priemerný mesačný úhrn zrážok a počet zrážkových dní, ČR

Na záver možno zhodnotiť, že klimatické podmienky v oblasti Kašmíru sú ovplyvnené najmä veľmi malou zrážkovou činnosťou, čo je spôsobené polohou oblasti medzi himalájskymi vrcholmi. Tá taktiež spôsobuje nedostatok iných surovín v oblasti. Aj keď sú teploty porovnateľné s teplotami v strednej Európe, vplyvom nízkej relatívnej vlhkosti je pocitová teplota vyššia a v dôsledku malej oblačnosti a vysokého počtu dní bez oblačnosti je oblasť vhodná pre využitie solárnej energie. Jedná sa o jedinou energiu, ktorej je v himalájskych náhorných plošiach a priesmykoch prebytok.

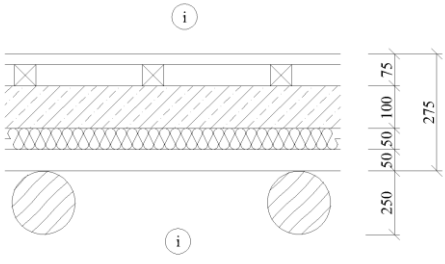
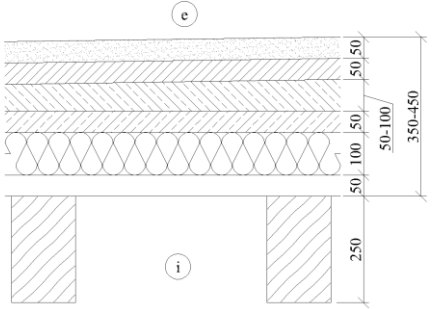
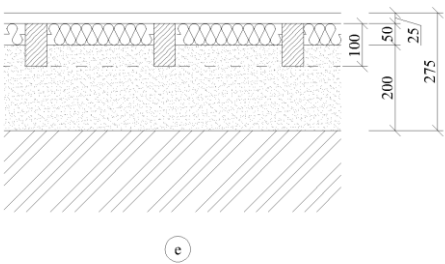
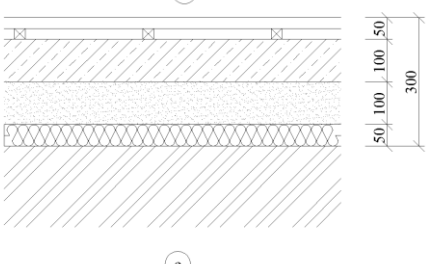
1.1.3 Posudzované objekty

Vnútročné prostredie bolo posudzované v dvoch budovách, ktoré majú odlišný systém vykurovania. Prvou je dvojpodlažná budova školského internátu s kapacitou 40 detí. Jednoduché výkresy k internátu sú v prílohe P.2. Pôdorysné rozmery internátu sú $37,5 \times 6$ m a výška objektu je 6 m. Konštrukčná výška podlažia je 2,9 m. Budova je orientovaná na južnú stranu, vstup do objektu je taktiež z juhu. Stavebné konštrukcie sú popísané v tab. 1.1. V stavbe možno nájsť prvky tradičnej tibetskej kultúry (využitie hliny ako hlavného stavebného materiálu, drevené stropy s trámami z guľatiny a záklopom z drevených prútov, hlinené omietky, tepelná izolácia zo slamy a pilín a pod.). Využité boli hlavne prírodné materiály z okolia stavby. Kvôli zjednodušeniu realizácie boli stropy z guľatiny realizované len v 1. NP a v ostatných prípadoch boli nahradené dreveným hraneným rezivom.

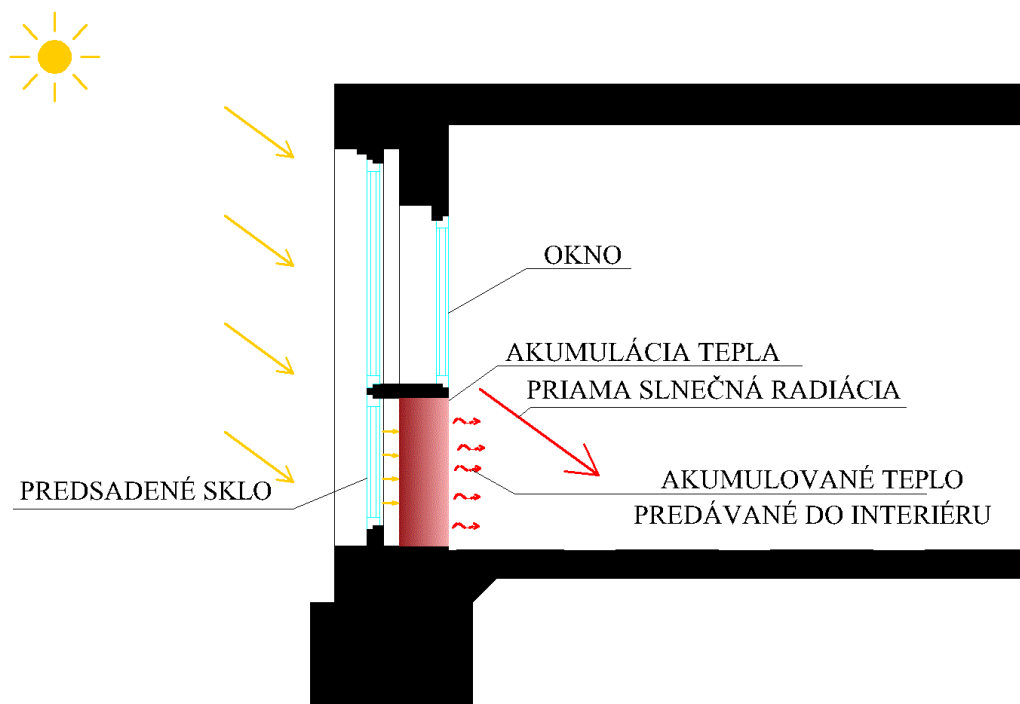
Tab. 1.1: Skladby stavebných konštrukcií

Ozn.	Skladba konštrukcie	Popis skladby (z exteriéru do interiéru/zhora nadol)	Hrúbka [mm]
SO 1 Obvodová stena		<ul style="list-style-type: none"> - Hlinená omietka - Stena z vystuženej dusanej hliny - Tepelná izolácia zo slamy a drevených pilín - Stena z vystuženej dusanej hliny - Hlinená omietka 	20 300 100 300 20
SO 2 Stena vnútorná a akumulčná		<ul style="list-style-type: none"> - Hlinená omietka - Stena z vystuženej dusanej hliny - Hlinená omietka 	20 300 20
STR 1 Vnútrotný strop		<ul style="list-style-type: none"> - Drevená podlaha - Nosníky 75×100 mm, rozteč 300 mm - Vrstva piesku - TI – dusaná slama a piliny - Separačná vrstva – textília, kartón - Záklop – vřbové prúty v 1.NP, v 2.NP boli použité drevené dosky - Nosníky – guľatina, v 2.NP boli použité hranené dosky 	25 100 150 50 50 250

Tab. 1.1: Skladby stavebných konštrukcií - pokračovanie

Ozn.	Skladba konštrukcie	Popis skladby (z exteriéru do interiéru/zhora nadol)	Hrúbka [mm]
STR 2 Vnútorný strop, kúpeľňa		<ul style="list-style-type: none"> - Odnímateľný drevený rošt - Roznášacia betónová vrstva - TI – dusaná slama a piliny - Separáčna vrstva – textília, kartón - Záklop – vĺbové pruhy - Nosníky – guľatina 	75 100 50 50 250
STR 3 Strešná konštrukcia		<ul style="list-style-type: none"> - Ochranná vrstva z piesku - Ílová vrstva - Spádová vrstva – blato, bahno - Roznášacia vrstva – blato, bahno - TI – dusaná slama a piliny - Separáčna vrstva – textília, kartón - Záklop – drevené dosky - Nosníky – hranoly 150×250 mm 	50 50 50-100 50 100 50 250
PDL 1 Podlaha na zemine		<ul style="list-style-type: none"> - Drevená podlaha - Nosníky 75×100 mm, rozteč 300 mm - TI – dusaná slama a piliny (medzi nosníkmi) - Zhutnený piesok - Pôvodná zemina 	25 100 50 200
PDL 2 Podlaha na zemine, kúpeľňa		<ul style="list-style-type: none"> - Odnímateľný drevený rošt - Betónová vrstva - Vrstva zhutneného piesku - TI – dusaná slama a piliny - Pôvodná zemina 	50 100 100 50

Na obr. 1.6 je znázornený princíp vykurovania interiéru školského internátu. Južná obvodová stena je riešená ako tzv. Trombeho stena – pred stenou hrúbky 300 mm je predsadené sklo. Pre zvýšenie emisivity je vonkajší povrch natretý čiernou farbou. Behom slnečných dní je v stene akumulované teplo vplyvom slnečnej radiácie. Toto teplo je s oneskorením predávané ďalej do interiéru a tým sa dosahuje určitá tepelná stabilita v miestnosti. V priebehu dňa je interiér ohrievaný slnečným žiarením prechádzajúcim oknom.



Obr. 1.6: Princíp vykurovania interiéru školského internátu solárnou stenou

Na obr. 1.7 je južná fasáda školského internátu. Fotografia je zachytená v decembri roku 2015, kedy ešte nebola budova úplne dokončená. Pri návrhu boli použité prvky klasickej tibetskej architektúry, ako napr. zdobenie prekladov nad otvormi a plochá strecha. Prehrievaniu interiéru v letnom období majú zabrániť slnolamy.



Obr. 1.7: Budova školského internátu

Druhou posudzovanou budovou z hľadiska kvality vnútorného prostredia je objekt samotnej školy (viď obr. 1.8). Pôdorysy sú v prílohe P.1. Obdobne ako internát má aj budova školy dve podlažia, pričom v každom podlaží sú 4 učebne s kapacitou 32 detí. Pôdorysné rozmery sú 45×5,8 m, výška objektu a svetlá výška miestností sú rovnaké ako v prípade internátu. Celková kapacita objektu je 260 detí. Opäť možno nájsť prvky tibetskej architektúry, avšak z finančných dôvodov neboli realizované snolamy. Tepelné zisky oknom v letnom období budú musieť obmedziť ostatné tieniace prostriedky, napr. závesy, prípadne intenzívne vetranie.

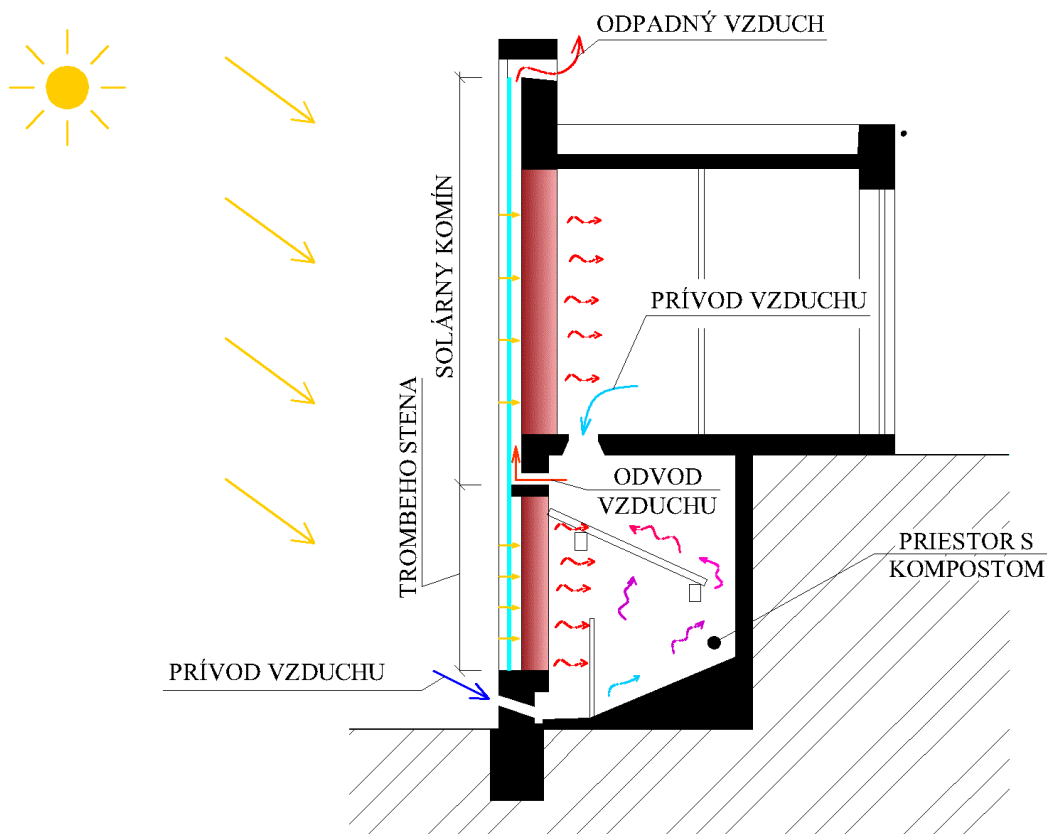


Obr. 1.8: Budova školy

Stavebné konštrukcie sú obdobné ako v prípade školského internátu, rozdiel je v skladbe obvodovej steny, kde na strane interiéru bolo namiesto liatej dusanej hliny použité murivo z tradičných nepálených tehál hrúbky 150 mm. Z dôvodu jednoduchšej realizácie bolo upustené od tradičných stropných trámov z guľatiny s prúteným záklopom. Namiesto toho bolo na trámy využité hranené rezivo so záklopom z drevených dosiek. Filozofia využívania solárnej energie je oproti internátu odlišná. Keďže v škole nie je potrebné udržiavať tepelnú stabilitu v nočných hodinách, je južná fasáda celá presklená za účelom maximalizácie tepelných ziskov priamou slnečnou radiáciou a konvekciou oknami. Predpokladá sa teda rýchly nárast vnútornej teploty v ranných hodinách a pokles teplôt v interiéru po západe slnka vplyvom nízkej akumulačnej schopnosti obálky budovy.

V oboch budovách nie je nainštalovaný žiadny iný zdroj tepla a preto sú budovy celkom závislé na solárnej energii. V zamračených dňoch bude teplota interiéru závisieť hlavne na vnútorných tepelných ziskoch, najmä na obsadenosti ľudmi a ich fyzickej aktivite. Tibetský systém výuky je odlišný od európskeho a okrem samotnej výuky sú tu zaradené aj rôzne formy cvičení a meditácie. Takisto sociálne zmýšľanie miestnych ľudí je odlišné, preferujú zdieľanie jednej miestnosti veľkým počtom osôb pred samotou. Tieto skutočnosti môžu mať takisto významný vplyv na priebeh vnútornej teploty v interiéru.

Posledným objektom, kde prebehlo meranie, je objekt suchých WC (vid' prílohy P4 a P5). Návrh tohto objektu rešpektuje tradičné tibetské nakladanie s biologickým odpadom, z ktorého sa vytvára kompost a ten je následne využívaný na hnojenie. Nepříjemným sprievodným javom tvorby kompostu je zápach šíriaci sa z priestoru s kompostom. Tomu má zabrániť vylepšená verzia tohto záchodu, v ktorej je priestor s kompostom vetraný solárnym komínom využívajúcim komínový efekt. Zároveň je teplota interiéru zvyšovaná pomocou solárnej steny. Vďaka odvetraniu a zbavovaniu moču sa predpokladá tvorba kvalitnejšieho kompostu.



Obr. 1.9: Princíp ohrevu a vetrania toaliet

Princíp fungovania toalety je znázornený na obr. 1.9. Priestor s kompostom je v spodnej časti záchodu. Naklonená rovina v tomto priestore z perforovaných trubiek slúži k pomalšiemu klesaniu kompostu a jeho postupnému vysušovaniu. Drážka v spodnej časti slúži na odvod moču. Je zrejmé, že záchod je vhodné umiestniť do svahu a situovať vstup zo severnej strany. Južná fasáda je presklená, časť steny je riešená ako solárna stena a slúži na ohrev vnútorného priestoru a časť steny funguje ako solárny komín. Studený vzduch prichádza do priestoru s kompostom otvormi v spodnej časti tohto priestoru a taktiež samotným otvorom záchodu zo samotnej miestnosti. Kompostujúci priestor je ohrievaný jednak solárnou stenou a jednak vyššou teplotou exkrementov. Priestor solárneho komína medzi stenou a sklom sa vplyvom slnečnej radiácie ohrieva a teploty by mali dosahovať vysokých hodnôt. V priestore s kompostom by tak mal vzniknúť vplyvom teplotného rozdielu podtlak a vzduch z tohto priestoru by mal byť komínovým efektom vytláčaný odvodnými otvormi do solárneho komína a následne do exteriéru. Je vhodné konštatovať, že tieto úvahy vznikli čisto empiricky a funkčnosť celého systému bude potrebné overiť experimentálne.

1.2 Legislatíva, požiadavky v ČR a oblasti Kašmíru

Pred akýmkoľvek hodnotením alebo meraním je nutné si ujasniť, akých parametrov vnútorného prostredia chceme dosiahnuť a čím sme právne zaviazaní. Kým v Česku existuje rada legislatívnych predpisov stanovujúcich požiadavky na vnútorné prostredie školských zariadení, v himalájskom prostredí indického štátu Džammú a Kašmír žijú miestni často v podmienkach, ktoré by európsky človek, zvyknutý na pohodlie, definoval ako značne nevyhovujúce. V betónových domoch je priemerná vnútorná teplota vzduchu okolo 10 °C a v zime často klesá až k 0 °C. V priebehu dňa je niekedy dokonca teplejšie v exteriéri. Preto miestni väčšinu zimy sedia vonku a vnútri sa zdržiavajú len v čase varenia alebo v nočných hodinách, kedy vonkajšie teploty klesajú pod bod mrazu. Je teda potrebný odlišný prístup k hodnoteniu vnútorného prostredia v tejto oblasti.

1.2.1 Požiadavky na vnútorné prostredie v ČR

V Českej republike existuje viacero predpisov, pričom za rozhodujúce možno okrem iných považovať predpisy [4] a [5]. Predpis [4] okrem iného stanovuje priestorové podmienky na učebne, kde na jedno dieťa musí podlahová plocha miestnosti slúžiaca ako herňa alebo miestnosť na spanie činiť min. 4 m², v učebniach je to min. 1,65 m². Pre ubytovanie v domovoch mládeže, internátoch, v zariadeniach pre deti vyžadujúce okamžitú pomoc a pod. (ďalej len „ubytovacie zariadenia“) je najmenšia ubytovacia plocha izby 6 m² na jedného ubytovaného. Taktiež stanovuje požiadavky na počet hygienických zariadení a podobne. Taktiež musí byť zriadená študovňa, kde sa stanoví minimálne 1 m² na jedného žiaka. Podľa [5] je maximálna prípustná výsledná teplota vzduchu v internátu 24 °C ± 2 °C v lete a 22 °C ± 2 °C v zime.

Z hľadiska porovnania so skúmanou školou sú zaujímavé požiadavky predpisu [4] na mikroklimatické podmienky. Optimálnu výslednú teplotu v učebniach stanovuje na 22 °C, pričom povoľuje kolísanie teploty v rozmedzí 20 – 28 °C, podľa [5] maximálne 26 °C. Rozdiel výslednej teploty v úrovni hlavy a podlahy nesmie byť väčší než 3 °C. Optimálnu relatívnu vlhkosť stanovuje na 30 – 65 %. Pri poklese vnútornej teploty vzduchu v učebniach určených pre pobyt žiakov v troch po sebe nasledujúcich dňoch pod 18 °C, alebo pri poklese teploty vnútorného vzduchu v týchto miestnostiach pod hodnotu 16 °C v jednom dni musí byť prevádzka týchto zariadení pre výchovu a vzdelávanie zastavená.

Pokiaľ vonkajší stav prostredia neumožňuje využiť prirodzené vetranie pre prekroenie prípustných hodnôt koncentrácií škodlivín, musia byť požadované mikroklimatické podmienky zaistené vzduchotechnickým zariadením. Minimálna dávka vzduchu na jedného žiaka je pre učebne podľa [4] 20 až 30 m³ za hodinu. Požiadavky na koncentráciu škodlivín určuje [5]. V tejto vyhláške však nie sú uvedené požiadavky na maximálnu koncentráciu oxidu uhličitého pre školské zariadenia. Pritom je v súčasnosti trend utesňovať školské zariadenia plastovými oknami a zatepl'ovacími systémami bez akéhokoľvek riešenia vetrania. Výsledkom je zvyšujúca sa koncentrácia oxidu uhličitého, ktorý môže mať za následok zvýšenú únavu a nesústreďenosť žiakov.

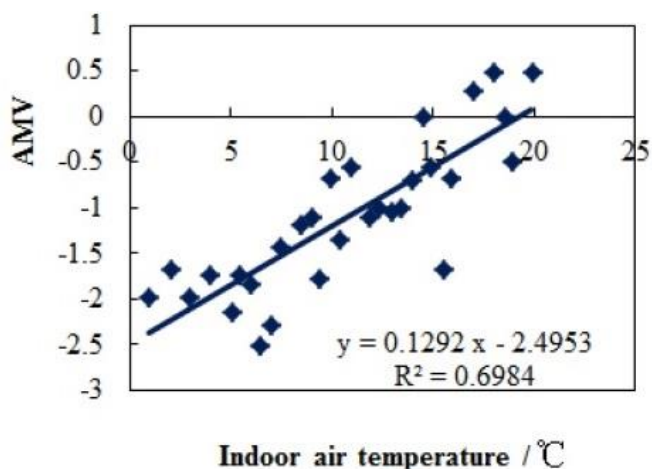
Uvedené predpisy stanovujú okrem iného aj požiadavky na zásobovanie vodou. Na jedného žiaka musí byť k dispozícii najmenej 25 l na deň, v ubytovacích zariadeniach je to potom 200 l na jedného ubytovaného za deň.

1.2.2 Požiadavky na vnútorné prostredie v Kašmíru

V oblastiach náhorných plošín je situácia odlišná. Prakticky neexistujú právne predpisy určujúce požiadavky na kvalitu vnútorného prostredia a v prípade, že by existovali, by bolo ich dodržiavanie v oblastiach s nedostatkom klasických palív (zemný plyn, drevo a podobne) ťažko predstaviteľné. Môžeme teda porovnávať hodnotenú budovu s požiadavkami užívateľov a hodnotiť, do akej miery sú ich očakávania naplnené. Jednou z možností, ako definovať tieto požiadavky, je opierať sa o rôzne výskumy, ktoré v týchto končinách prebiehajú napr. formou dotazníkov. Vznikajú publikácie, ktoré dávajú aspoň čiastočný obraz o tom, čo miestni obyvatelia považujú za dostačujúce.

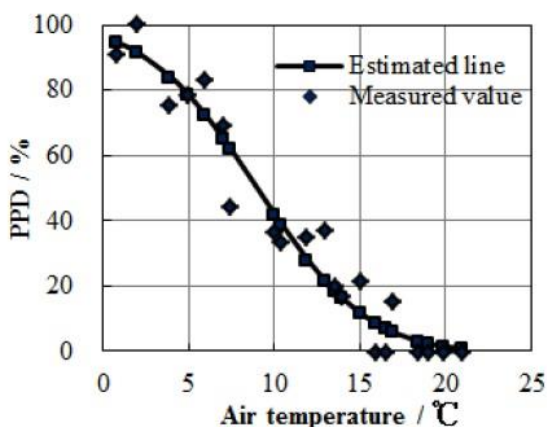
Situácia v Tibete je zhrnutá v článku [6]. V ňom publikované výsledky vznikli na základe objektívnych meraní operatívnej teploty doplnených o subjektívne vnímanie miestnych obyvateľov. Respondenti mali subjektívne ohodnotiť danú situáciu na stupnici podľa štandardu ASHRAE [7] od -3 (zima) do +3 (teplo), kde 0 znamená ideálny stav, ktorý možno označiť ako tepelná pohoda, kde daná osoba nepocituje teplo ani zimu. V oblasti Tibetu nemá centrálné vykurovanie okolo 60 % domácností a z toho 40 % nemá žiadny systém vykurovania, teda ani lokálny. S narastajúcou nadmorskou výškou a klesajúcim tlakom vzduchu stúpa celková tepelná strata ľudského tela. Je teda jasné, že obyvatelia majú iné očakávania vyplývajúce z ich sociálne – kultúrnych zvykov, skúsenosti a iných, zväčša psychologických vplyvov.

Kvôli vyššej slnečnej radiácii sa miestni sústreďujú počas dňa v južných častiach domu. V tradičných domoch slúži južná miestnosť ako obývačka, priestor pre stolovanie a spanie. Taktiež miestne tradičné oblečenie je omnoho ťažšie, aj keď v posledných rokoch je vidieť vplyv ostatných kultúr aj na oblečení a tradičné tibetské róby postupne ustupujú na úkor západného oblečenia. Tepelná izolácia oblečenia miestnych je v priemere 1,54 clo (1 clo predstavuje izolačnú hmotu s tepelným odporom $R = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) a je vyššia u žien a taktiež u ľudí z domácnosti bez systému vykurovania. V neposlednom rade tibetská kalorická strava bohatá na bielkoviny podporuje rýchlejší metabolizmus, čo ľuďom umožňuje produkovať viac tepla. Na obr. 1.10 je graf vychádzajúci z výskumu [6]. AMV („actual mean vote“) znamená hodnotenie respondenta podľa stupnice ASHRAE. Na spodnej stupnici grafu je operatívna teplota interiéru. Graf teda vyjadruje spokojnosť človeka na aktuálnu teplotu interiéru.



Obr. 1.10: Lineárna regresia založená na závislosti AMV na teplote vzduchu

Na základe tohto grafu je teda tepelná pohoda dosiahnutá pri teplote 19,3 °C. Graf je však výsledkom lineárnej regresie a bohužiaľ, nie vždy budú všetci spokojní. Tepelná neutralita nemusí znamenať tepelnú pohodu, avšak neutralita je vždy podmienkou tepelnej pohody. Cieľom je vytvoriť také mikroklima, s ktorým by bolo spokojných čo najviac osôb. To vyjadruje index PPD („predicted percentage dissatisfied“), ktorý udáva predpokladané percento ľudí nespokojných so stavom vnútorného prostredia. Empirický výskum [8] hovorí, že u veľkej skupiny ľudí, vystavených tomu istému prostrediu, bude vždy aspoň 5 % nespokojných. Výsledkom výskumu [6] je aj percento nespokojných pre oblasť Tibetu v závislosti na teplote vzduchu. Táto závislosť je znázornená na obr. 1.11. Výskum považuje za prijateľnú hodnotu PPD 20 %, teda teplotu vzduchu 13,3 °C.



Obr. 1.11: Predpokladané percento nespokojných v závislosti na teplote vzduchu

Pre porovnanie sú uvedené aj teploty vzduchu pri 20 % PPD iných miest. Pre San Francisco je to v rozmedzí 20 – 24 °C, pre Slovensko je to od 20 °C až do 27 °C [9]. Naproti tomu sú Tibetania adaptovaní na omnoho nižšie teploty. Príčinu možno hľadať v aklimatizácii na vysokohorské chladné podnebie a taktiež sú ovplyvnení inými faktormi, popísanými vyššie.

1.3 Ciele práce

Účelom práce je posúdiť kvalitu vnútorného prostredia školského komplexu popísaného v kap. 1.1. Bude posudzovaná výsledná vnútorná teplota a relatívna vlhkosť. Súčasný stav mikroklimy bol monitorovaný experimentálnou metódou a výsledky meraní sú porovnané s hodnotami uvedenými v kap. 1.2.2. Pri hodnotení súčasného stavu teda sledujeme, do akej miery spĺňa objekt očakávania užívateľov. U toaliet bol meraný priebeh teplôt v jednotlivých častiach solárneho komína a výsledky môžu poslúžiť ako podklad pre simulovanie prúdenia vzduchu a pod. Podrobnejšie je experimentálna metóda popísaná v ďalšej kapitole.

Súčasťou práce je matematická simulácia. S využitím výpočtovej techniky boli vytvorené matematické modely internátu aj školského bloku, na ktorých boli spustené rôzne simulácie. Simulácie umožňujú analyzovať mieru využitia jednotlivých zdrojov tepla a výsledky sú porovnané s hodnotami v kap. 1.2.1 a 1.2.2. Súčasťou je aj návrh vhodného zdroja tepla potrebného k dodržaniu parametrov stanovených v týchto kapitolách.

2 Metódy riešenia

Energetické hodnotenie vychádza z experimentálneho riešenia. To spočíva v meraní teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti vzduchu na viacerých miestach budov. Modelové riešenie s využitím softwaru postihujúce zadanú problematiku spočíva vo vytvorení matematického modelu budov, vhodnej voľbe okrajových podmienok a tvorbe simulácií. Celkové hodnotenie spočíva v porovnaní výsledkov týchto metód a ich následnej analýze.

2.1 Experimentálne riešenie

2.1.1 Popis meracej techniky

V celom komplexe bolo nainštalovaných celkovo štrnásť dataloggerov COMET na meranie teplôt a relatívnej vlhkosti a jeden datalogger LUTRON LX 1128 SD na meranie osvetlenosti (viď obr. 2.1). Z toho boli inštalované tri štvorkanálové dataloggery COMET S0141 s externými teplotnými sondami. Jeden takýto datalogger bol použitý na meranie povrchových teplôt obvodovej steny internátu. Teplo získané od slnečnej radiácie a akumulované v stene sa odovzdáva do interiéru s určitým časovým oneskorením. Tento fázový posun teplotných kmitov možno vyhodnotiť práve meraním povrchových teplôt konštrukcie na strane exteriéru aj interiéru počas určitého časového obdobia, v našom prípade 24 hodín.

Ďalšie dva štvorkanálové dataloggery boli použité na meranie teplôt vzduchu v rôznych častiach solárneho komína záchodov. Meranie prebieha na dvoch typoch záchodov, preto bolo nutné použiť dva dataloggery. K meraniu teploty a relatívnej vlhkosti priestoru s kompostom bol použitý datalogger s možnosťou pripojenia externej sondy, čím sa zamedzilo znečisteniu dataloggeru. Zvyšných desať dataloggerov COMET S3120 slúži na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu meraných miestností internátu a školy. Miestnym obyvateľom bol predaný a nainštalovaný potrebný software a boli zaškolení v jeho používaní.



Obr. 2.1: Použitá meracia technika

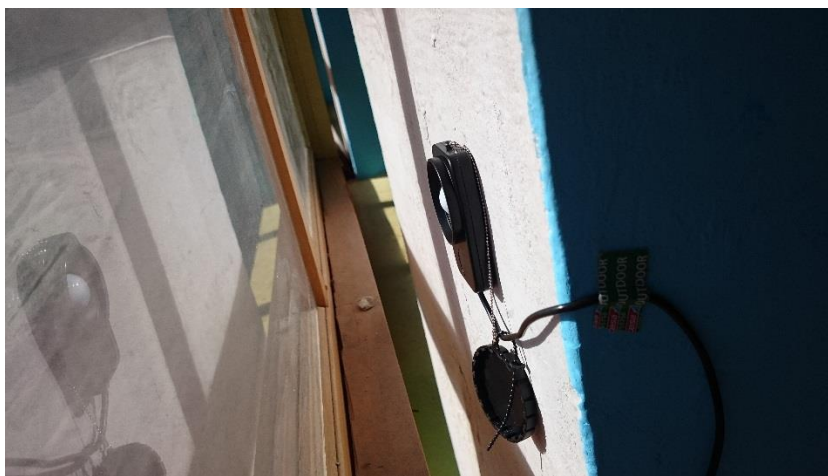
2.1.2 Popis merania

Meracia technika bola inštalovaná na začiatku decembra 2015. Na všetkých čidlách bol nastavený aktuálny čas a samotné meranie bolo spustené v jednotný čas, 6.12.2015 o 15:45:00 miestneho času (GMT +5:30). Interval zapisovania bol nastavený na 15 minút. Pamäť štvorkanálových loggerov sa naplní najrýchlejšie a mala by pri zvolenom intervale vystačiť na cca dva mesiace, preto bolo nutné priebežne dáta sťahovať a premazávať pamäť. Za týmto účelom boli vyškolení miestni správcovia školy, s ktorými sme naďalej udržiavali kontakt telefonicky alebo prostredníctvom e-mailov.

V budove školy boli inštalované celkovo dataloggery COMET na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu. Jedná sa o školské zariadenie, kde sa pohybujú väčšinou deti, preto boli čidla umiestnené na strop v strede miestnosti, ako je vidieť na obr. 2.2. Merané sú dve učebne v prízemí (jedna v rohu budovy a jedna v strede dispozície) a dve učebne na poschodí. Okrem toho je v škole umiestnený datalogger na meranie osvetlenia (ďalej len „lux meter“), ktorý je umiestnený na stĺpe za oknom vo výške 1,5 m (viď obr. 2.3). Podľa osvetlenia si dokážeme orientačne utvoriť predstavu o veľkosti intenzity slnečného žiarenia.

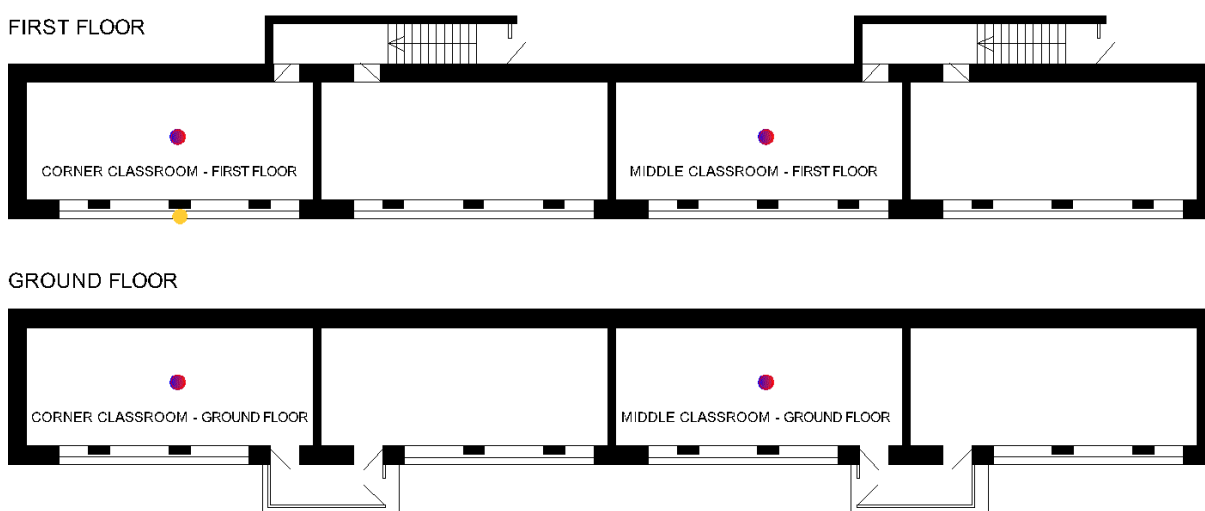


Obr. 2.2: Inštalácia čidiel na strop



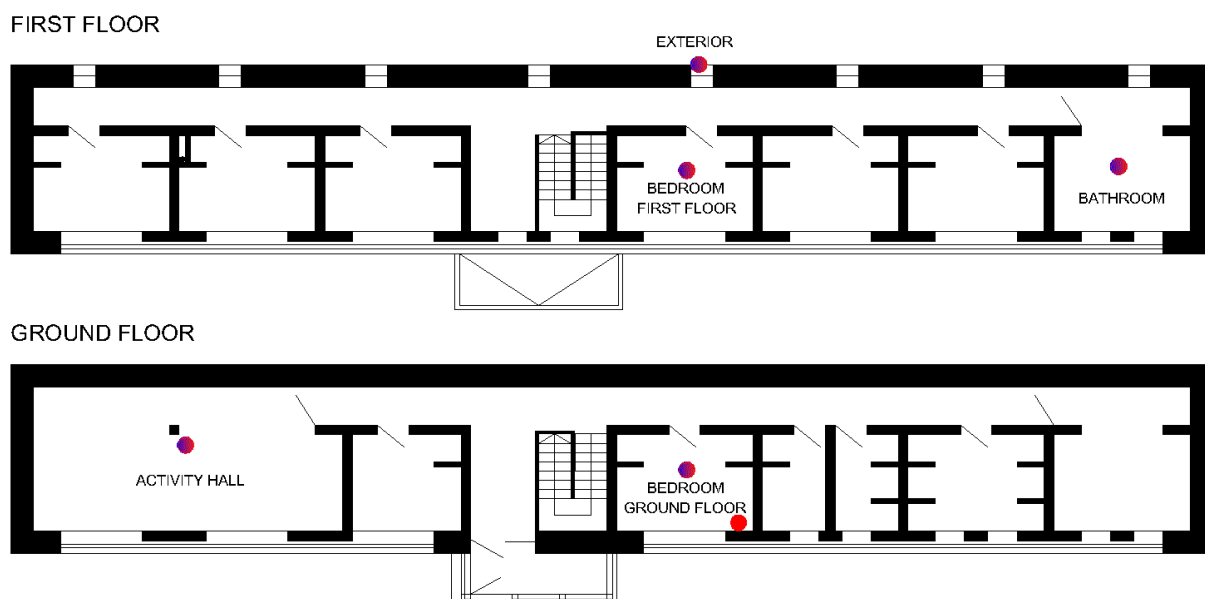
Obr. 2.3: Umiestnenie čičky luxmetra na meranie zvislej osvetlenosti

Poloha čidiel je jasná z obr. 2.4. Červeno modré krúžky na tomto obrázku znázorňujú datalogger COMET merajúci teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu miestnosti. Žltý krúžok znázorňuje polohu lux metru. Na všetkých čidlach je nastavený rovnaký čas a interval zápisu, čo umožňuje sledovať priebehy meraných hodnôt v jednom časovom kroku na všetkých čidlach naraz. V škole je podstatný priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí v čase výuky a závislosť týchto veličín na intenzite slnečného žiarenia a ostatných veličinách exteriéru. Z obrázku je vidieť, že bude možné stanoviť rozdiely medzi podlažiami a taktiež medzi rohovou učebňou a učebňou v strede dispozície.



Obr. 2.4: Rozmiestnenie čidiel v budove školy

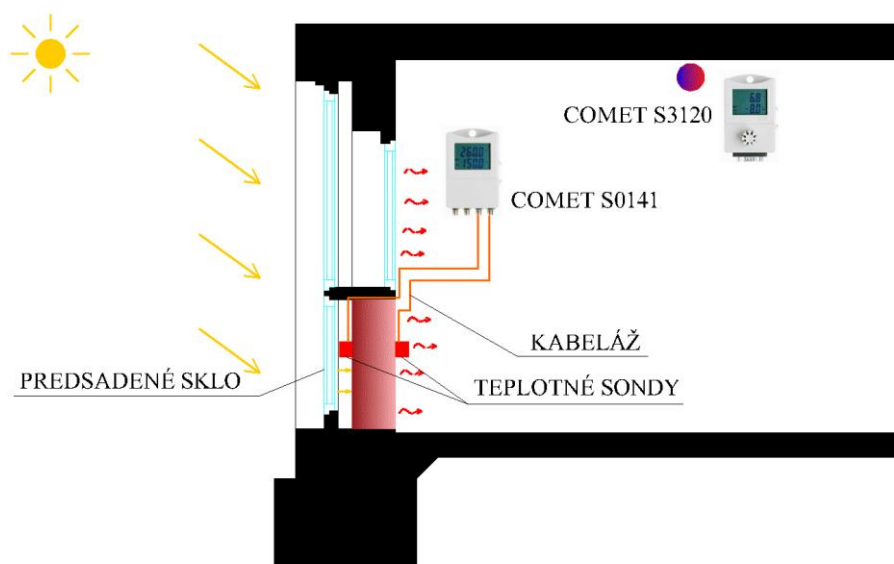
Z konštrukčného hľadiska je zaujímavejšia budova školského internátu. Tu bolo umiestnených celkovo 5 jednokanálových dataloggerov určených na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu a 1 štvorkanálový teplomer s externými sondami. Ten slúži na meranie povrchových teplôt a vyhodnotenie fázového posunu.



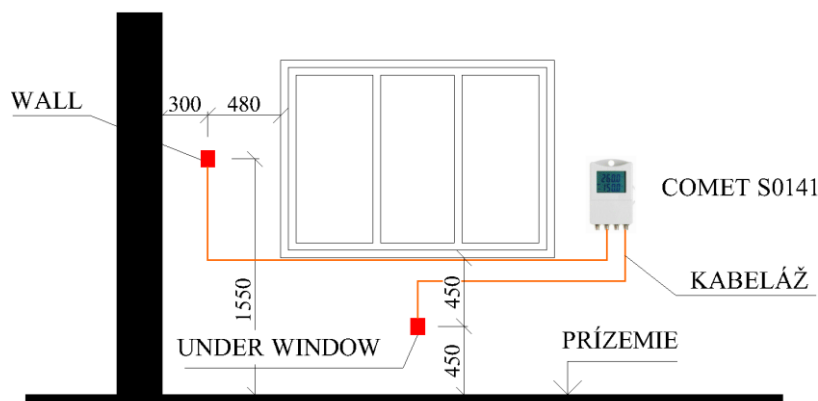
Obr. 2.5: Rozmiestnenie čidiel v budove školského internátu

Na obr. 2.5 je vyznačená poloha jednotlivých čidiel v školskom internáte. Červeno modrý krúžok opäť značí meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu a opäť boli umiestnené na strop z dôvodu ochrany pred poškodením. Boli merané 4 miestnosti, budeme môcť sledovať rozdiel medzi prízemím a poschodím. Datalogger umiestnený v okne označený ako „exterior“ je kvôli ochrane pred dažďom umiestnený na spodnej strane nadpražia otvoru a slúži na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vonkajšieho vzduchu. Údaje z tohto čidla možno porovnať s typickými klimatickými podmienkami uvedenými v prvej kapitole tejto práce. V miestnosti „Activity hall“ sa bude vo večerných hodinách zdržiavať väčšie množstvo so zvýšenou fyzickou aktivitou, preto sa predpokladajú zvýšené tepelné zisky od osôb.

Červený krúžok značí umiestnenie štvorkanálového dataloggeru na meranie povrchových teplôt. Jeho poloha nebola zvolená náhodne, jedná sa o miestnosť, kde býva správca internátu a preto je znížené riziko poškodenia dataloggerov. Schematicky je umiestnenie sond znázornené na obr. 2.6. a 2.7. Priebehy povrchových teplôt boli merané v dvoch miestach – pod oknom a vedľa okna. Okrem toho je v miestnosti zaznamenávaná aj teplota a relatívna vlhkosť vzduchu, takže bude možné vidieť zmenu stavu vzduchu v miestnosti v závislosti zmene povrchových teplôt.



Obr. 2.6: Schematické znázornenie merania priebehu povrchových teplôt



Obr. 2.7: Meranie povrchových teplôt

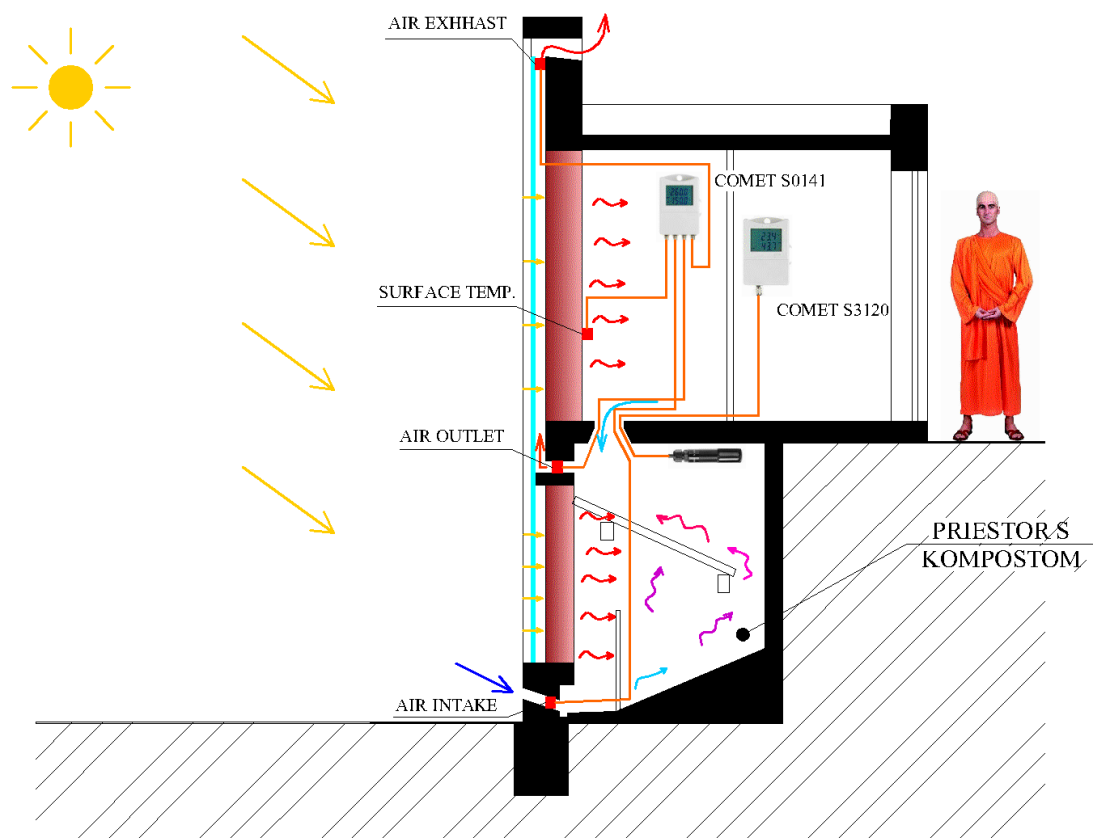
Kvalita vnútorného prostredia je hodnotená v školskom internáte a samotnej budove školy. V budove s toaletami bol monitorovaný priebeh teplôt v rôznych častiach solárneho komína. Na obr. 2.8 o je južný pohľad na záchody v čase inštalovania meracej techniky. Významné budú až výsledky z merania po dokončení záchodov a ich uvedeníu do prevádzky. Vchod do miestnosti je zo severnej strany. Otvor, ktorý je vidieť na fotografii, slúži na vyberanie kompostu. Jedná sa o dva odlišné typy záchodov. Vpravo je záchod s vylepšeným priestorom s kompostom, kde prívod vzduchu je otvormi v spodnej časti (viď obr. 2.8) a jeho odvod solárnym komínom. Záchod vľavo funguje obdobne ako tradičné tibetské záchody, avšak priestor s kompostom je opäť vetraný solárnym komínom. Prívod vzduchu je v tomto prípade priamo z miestnosti toalety samotným otvorom záchodu. Na rošt vľavo bude osadené sklo, vpravo je osadený vlnitý plech. Na základe porovnania priebehu teplôt možno zhodnotiť, ktorá verzia je účinnejšia.



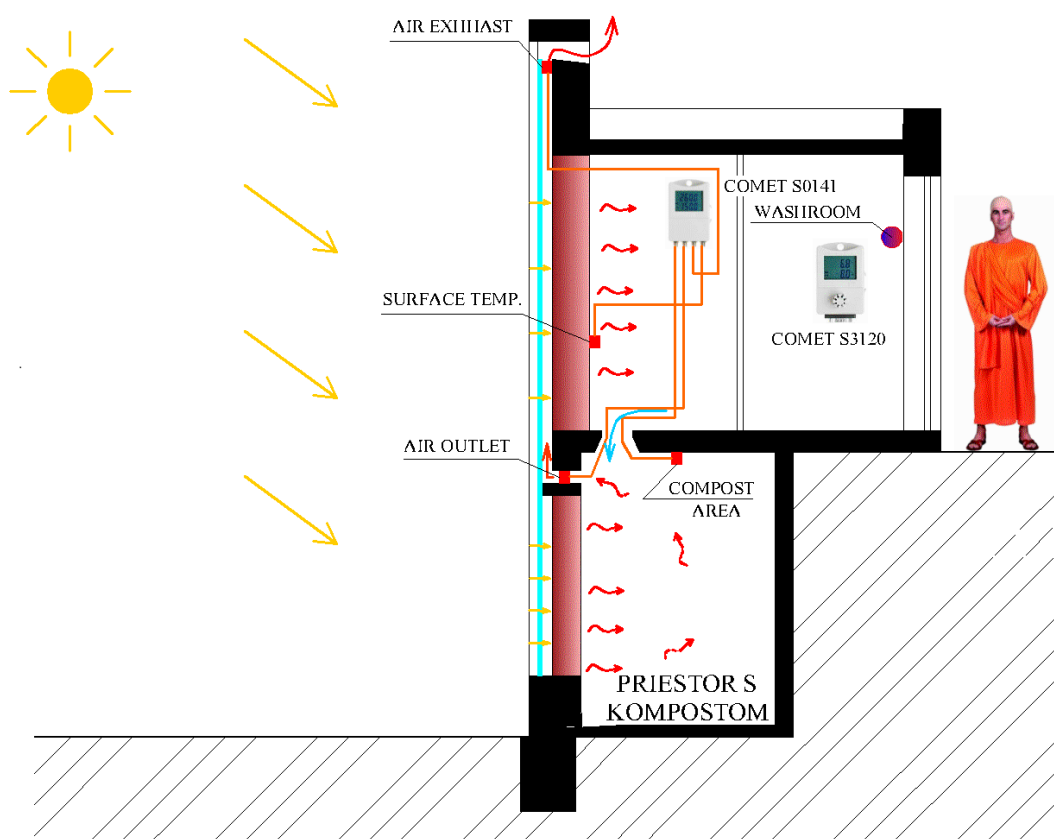
Obr. 2.8: Objekt záchodov

Z fotografie je dobre vidieť aj rozdelenie fasády na solárny komín a solárnu stenu. Nad vstupom do priestoru s kompostom je časť slúžiaca výhradne na ohrev vnútorného priestoru. Po stranách je solárny komín, v úrovni nadpražia otvoru je vidieť otvory na odvod vzduchu do solárneho komína. Betónový povrch bude natretý čiernou farbou pre zvýšenie emisivity.

V záchodoch boli osadené dva štvorkanálové teplomery COMET S0141, jeden datalogger COMET s externou sondou na meranie relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu v priestore s kompostom a jeden datalogger COMET S3120 na meranie relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu v priestore samotnej hygienickej miestnosti. U solárneho komína bola monitorovaná teplota prívodného vzduchu, teplota odvádzaného vzduchu a taktiež teplota vzduchu vychádzajúca z komína do vonkajšieho prostredia. Poznáme teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu v priestore s kompostom a taktiež v exteriéri. Môžeme tak vytvoriť obraz o zmenách stavu vzduchu pri prechode komínom. Avšak takéto meranie dáva obraz len o okamžitom stave komína, nakoľko jeho ťah je závislý na veľkom množstve okrajových podmienok (smer a rýchlosť prúdenia vetra, aktuálne tlakové a teplotné pomery a podobne). Na strane interiéru boli sledované povrchové teploty steny pod oknom v oboch typoch záchodov. Ich porovnaním možno zhodnotiť, ktorý typ exponovaného povrchu je pre vykurovanie vhodnejší. Rozmiestnenie jednotlivých dataloggerov a externých sond je schematicky znázornené na obr. 2.9 a 2.10. Súhrn všetkých dataloggerov je v tab. 2.1. Pre jednoduchšiu komunikáciu s miestnymi sú názvy jednotlivých externých sond a dataloggerov v anglickom jazyku. Pre záchod s vylepšeným priestorom s kompostom vymysleli miestni výraz „European Toilet“, jeho schéma je na obr. 2.9.



Obr. 2.9: Objekt s vylepšeným priestorom s kompostom



Obr. 2.10: Tradičný záchod s vylepšeným odvetraním priestoru s kompostom

Tab. 2.1: Výpis inštalovanej meracej techniky

Číslo	Sér. č.	Kanál	Umiestnenie	Popis kanálu
I	8932145	1	Bedroom, ground floor, surface temperatures	Wall - outside
		2		Wall - inside
		3		Under window - outside
		4		Under window - inside
II	8932190	1	European toilet	Compost area
III	11931341	1	European toilet	Surface temperature
		2		Air intake
		3		Ventilation (air outlet)
		4		Air exhaust
IV	11932171	1	Traditional toilet	Compost area
		2		Ventilation (air outlet)
		3		Air exhaust
		4		Surface temperature
V	14934177	1	Exterior	Window, hostel, north side
VI	14934180		Hostel	Activity hall
VII	14934188		Hostel	Bedroom - ground floor
VIII	14934189		Hostel	Bedroom - first floor
IX	14934191		Hostel	Bathroom
X	14934194		Classroom block	Middle classroom, ground floor
XI	14934195		Classroom block	Corner classroom, ground floor
XII	14934209		Classroom block	Middle classroom, first floor
XIII	14934211		Classroom block	Corner classroom, first floor
XIV	14934230		Toilet	Washroom
XV	Q896475	1	Corner classroom, first floor	Luxmeter

2.2 Riešenie využívajúce výpočtovú techniku a modelovanie

Táto metóda spočíva vo vytvorení čo najvernejšieho modelu posudzovaného objektu tak, aby boli zachované dôležité parametre jednotlivých konštrukcií. Na vytvorený model sa nadefinujú potrebné okrajové podmienky a spustí sa simulačné riešenie. Táto diplomová práca sa zaoberá simulačným riešením budovy školy a školského internátu v softvare BSim, verzia 7.13.10.1. Geometria budov bola vytvorená na základe projektovej dokumentácie, ktorú predložila organizácia Brontosauři v Himálajách [1]. Keďže pri výstavbe boli využité lokálne prírodné materiály, bolo nutné tieto materiály nadefinovať a vypočítať niektoré ich fyzikálne vlastnosti. Súhrn vlastností použitých stavebných konštrukcií je v tab. 2.2. Separačná vrstva bola vo výpočtoch zanedbaná, rovnako ako drevený rošt v kúpeľni. Hodnoty v tejto tabuľke sú výsledkom štúdia viacerých zdrojov ([10] – [14] a mnohé iné, najmä internetové) a u nehomogénnych vrstiev je hodnota tepelnej vodivosti výsledkom výpočtu 2D teplotného poľa.

Tab. 2.2: Fyzikálne vlastnosti použitých stavebných materiálov

Konšt.	č. v.	Materiál	d [m]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	R [m ² ·K·W ⁻¹]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ [kg·m ³]
OBVODOVÁ STENA (SO 1)	1	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1500
	2	Vystužená dusaná hlina	0,3	0,9	0,33	800	1600
	3	TI - slama a piliny	0,1	0,06	1,67	2000	100
	4	Vystužená dusaná hlina	0,3	0,9	0,33	800	1600
	5	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1500
VNÚTORNÁ STENA (SV 2)	1	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1500
	2	Vystužená dusaná hlina	0,3	0,9	0,33	800	1600
	3	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1500
OBVODOVÁ STENA (SO 3)	1	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1200
	2	Vystužená dusaná hlina	0,3	0,9	0,33	800	1600
	3	TI - slama a piliny	0,1	0,06	1,67	2000	100
	4	Murivo z nepálených tehál	0,15	1,2	0,13	1000	1600
	5	Hlinená omietka	0,02	0,47	0,04	980	1200
VNÚTORNÝ STROP (STR 1)	1	Drevená podlaha	0,025	0,22	0,11	2510	600
	2	Vrstva piesku + drevené nosníky	0,15	0,9	0,17	800	1600
	3	TI - slama a piliny	0,05	0,06	0,83	2000	100
	4	Separačná vrstva - textília					
	5	Záklop - drevené dosky	0,05	0,22	0,23	2510	600

Tab. 2.2: Fyzikálne vlastnosti použitých stavebných materiálov - pokračovanie

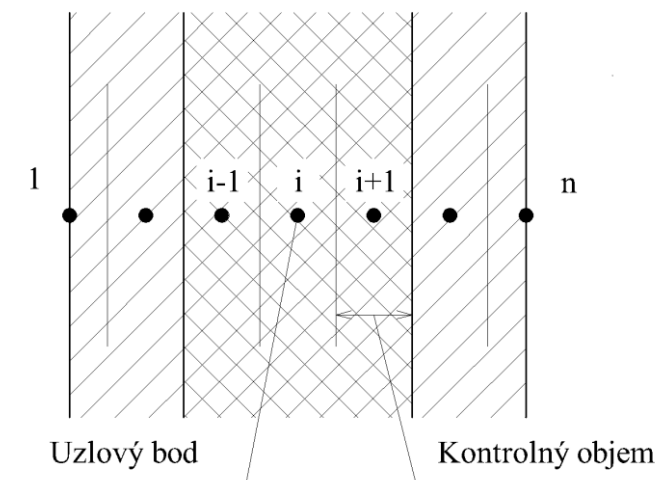
Konšt.	č. v.	Materiál	d [m]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	R [m ² ·K·W ⁻¹]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ [kg·m ³]
VNÚTORNÝ STROP, Kúpeľňa (STR 2)	1	Betónová vrstva	0,1	2,1	0,05	800	2400
	2	TI - slama a piliny	0,05	0,06	0,83	2000	100
	3	Separáčna vrstva - textília					
	4	Záklop - vřbové prúty	0,05	0,7	0,07	2600	600
STREŠNÁ KONŠTRUKCIA (STR 3)	1	Ochranná vrstva z piesku	0,05	1,6	0,03	800	1600
	2	Ílová vrstva	0,05	1,4	0,04	1200	1600
	3	Spádová vrstva - bahno, blato	0,05-0,1	1,6	0,05	800	1600
	4	Roznášacia vrstva - bahno, blato	0,05	1,6	0,03	800	1600
	5	TI - slama a piliny	0,05	0,06	0,83	2000	100
	6	Separáčna vrstva - textília					
	7	Záklop - drevené dosky	0,05	0,22	0,23	2510	600
PODLAHA NA ZE- MINE (PDL1)	1	Drevená podlaha	0,025	0,22	0,11	2510	600
	2	TI medzi nosníkmi - slama a piliny	0,05	0,087	0,57	2000	100
	3	Zhutnený piesok	0,2	1,6	0,13	800	1600
	4	Pôvodná zemina					
PODLAHA NA ZEMINE (PDL2)	1	Betónová vrstva	0,1	2,1	0,05	800	2400
	2	Zhutnený piesok	0,1	1,6	0,06	800	1600
	3	TI - slama a piliny	0,05	0,06	0,83	2000	100
	4	Pôvodná zemina					

Povrchovým úpravám interiéru bola priradená omietka červenej farby s emisivitou $\varepsilon = 0,9$. Podlahy sú drevené morené do tmavohnedej farby s $\varepsilon = 0,9$. Vonkajšie povrchy tvorí omietka svetlohnedej farby s emisivitou $\varepsilon = 0,88$ s výnimkou povrchov solárnej steny, kde je použitý matný čierny náter s emisivitou $\varepsilon = 0,94$.

Okná sú dvojkrídlové s jednoduchým zasklením a dreveným rámom hr. 0,1 m, lineárny činiteľ prestupu tepla $\psi_g = 0,06$. Priepustnosť svetla bola stanovená na 0,89 s ohľadom na prašné prostredie. Priepustnosť svetla bude vo výpočtoch ešte upravovaná podľa [15] pre rôzne prípady (napr. zatiahnuté závesy v škole v letnom období a podobne). Súčiniteľ prestupu tepla bol stanovený na $U = 5,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [16]. Dvere sú jednokrídlové celodrevené so súčiniteľom prestupu tepla $U = 2,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

2.2.1 Matematický základ programu BSim

Budova sa skladá z ľubovoľného počtu zón, ktorých počet je obmedzený ľubovoľným počtom plôch v konštrukcií. Okrem týchto zón má každý model tzv. virtuálnu zónu, ktorej pa-



Obr. 2.11: Rozloženie konštrukcie na kontrolné objemy a poloha uzlových bodov

rametre nie sú počítané, ale zadávané užívateľom, príp. sú načítané z dátového súboru. Tento súbor tvorí okrajové podmienky výpočtu. Vzduch v zóne je prezentovaný v uzlovom bode, v ktorom je počítaná teplota a obsah vodnej pary. Nie je teda možné vytvoriť napr. analýzu rozdelenia teplôt v rámci jednej zóny.

Konštrukcie sa skladajú z jednej alebo viacerých homogénnych vrstiev pozostávajúcich z jedného materiálu charakterizovaného tepelnými fyzikálnymi vlastnosťami. Pre presnejší výpočet sú hrubšie vrstvy rozdelené do niekoľkých tenších vrstiev (kontrolných objemov) tak, aby vzdialenosť uzlových bodov neprekročila hodnotu 0,05 m. Uzlové body sú umiestnené vždy v strede kontrolného objemu s výnimkou krajných kontrolných objemov, kde sú uzly umiestnené na povrchu konštrukcie. Každá konštrukcia teda má minimálne tri uzly.

Vedenie tepla v konštrukciach

Jedná sa o nestacionárny výpočet, v ktorom sa pre každý kontrolný objem sleduje, koľko tepla sa naindukovalo v susednom objeme v danom časovom kroku a koľko tepla sa odvieďlo. Tieto zmeny vedú k postupnej zmene entalpie objemu v každom časovom kroku, ktorá môže byť pomocou tepelnej kapacity prevedená na teplotnú zmenu.

Prestup tepla zo susedného elementu $i-1$ do kontrolného objemu i (viď obr. 2.11) môže byť vypočítaný na základe Fourierovej rovnice vedenia tepla. Využíva sa aproximácie, že postupnosť teplôt medzi uzlami týchto kontrolných objemov je rovnaká ako v ustálenom stave. Táto aproximácia teda nahrádza diferenciál teplotného rozdielu vo Fourierovom zákone gradientom vypočítaným z konečných teplotných rozdielov medzi uzlami konečnej vzdialenosti. Táto aproximácia je pomerne presná v prípade, že diskretizácia nie je príliš hrubá. Predpokladajme dva materiály s určitou tepelnou vodivosťou a kontrolné objemy o určitej hrúbke. Potom možno vypočítať prestup tepla v priestore za jednotku času (tepelný tok) v deliacej ploche medzi dvoma kontrolnými objemami v časovom kroku od času j do času $j+1$ podľa nasledujúcej rovnice (2.1).

$$q_i^{j+1} = -\frac{T_i^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_i} + R_i} \quad (2.1)$$

- q tepelný tok, W/m²
 Δx šírka kontrolného objemu, m
 λ tepelná vodivosť materiálu, W/m K
 R odpor medzi kontrolnými objemami, m²K/W
 i index polohy
 j index času

Tepelný tok sa vo vzťahu (2.1) počíta z teplôt na konci časového kroku. Pri výpočtu časového kroku $j+1$ sú však podmienky v závere tohto kroku zatiaľ neznáme, preto nie je možné explicitne zadať teploty na pravej strane vzťahu. Implicitný postup výpočtu je popísaný ďalej.

V priebehu časového kroku sa implicitne vyjadrený tepelný tok v nasledujúcej rovnici (2.2) pokladá za konštantný a zvýšenie entalpie pre kontrolný objem i je vyjadrené takto:

$$\rho_i \Delta x_i \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = -(q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}) \quad (2.2)$$

- h merná entalpia, J/kg
 Δt veľkosť časového kroku, s

Zmenu mernej entalpie možno vyjadriť ako zmenu teploty vynásobenú mernou tepelnou kapacitou c_p . Po vložení takto upraveného výrazu za tepelný tok v rovnici (2.1) dostávame vzťah:

$$(\rho c_p)_i \Delta x_i \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_i} + R_i} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\frac{\Delta x_i}{2\lambda_i} + \frac{\Delta x_{i+1}}{2\lambda_{i+1}} + R_{i+1}} \quad (2.3)$$

Táto rovnica je formulovaná pre všetky kontrolné objemy i a je riešená pre všetky naraz. Využíva sa pri tom vzájomných informácií o teplotách v novom časovom kroku, čo je možné len v prípade, že sú známe okrajové podmienky. Rovnicu (2.3) je preto potrebné formulovať pre krajný kontrolný objem $i = 1$ pri povrchu konštrukcie. Keďže krajný uzol leží blízko skutočnej fyzickej hranice, dostávame tvar:

$$(\rho c_p)_1 \Delta x_1 \frac{T_1^{j+1} - T_1^j}{\Delta t} = q_{surf,face1} + \frac{T_{air} - T_1^{j+1}}{R_{surf,face1}} + \frac{T_2^{j+1} - T_1^{j+1}}{\frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{2\lambda_2} + R_2} \quad (2.4)$$

- $q_{surf, face1}$ prestup tepla do povrchu konštrukcie, W/m²
 $R_{surf,face1}$ tepelný odpor pri prestupu tepla, m² K/W

Prestup tepla priamo do povrchu sa skladá zo slnečného dopadu do zóny ako aj tepla zdieľaného systémami do povrchov. Teplo od slnečného dopadu sa rozdelí podľa veľkosti povrchov, ale s rôznou váhou u podláh, stien a stropov, zatiaľ čo teplo od systémov sa rozdelí rovnomerne na všetky povrchy v zóne. Teplo zdieľané do vonkajších povrchov sa počíta zo slnečného dopadu na povrch s príslušným uhlom a orientáciou a prenasobením absorpčným súčiniteľom materiálu povrchu. U konštrukcií sa nepočíta s vplyvom tienenia od okolitých objektov. Pre použitie pri zostavovaní sústavy rovníc pre všetky objemy i zavádzame pre vnútorné kontrolné objemy substitúciu H a HO:

$$H_i = \frac{1}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_i} + R_i} \quad (2.5)$$

$$HO_i = \frac{(\rho c_p)_i \Delta x_i}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Pre kontrolný objem na povrchu 1 konštrukcie sa veličina HO vypočíta podľa (2.6), kým H1 a H2 sa stanovujú ako:

$$H_1 = \frac{1}{R_{surf,face1}} \quad (2.7)$$

$$H_2 = \frac{1}{\frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{2\lambda_2} + R_2} \quad (2.8)$$

Tomuto odpovedajúce výrazy sú platné pre H – funkcie (H_n a H_{n1}) blízko k povrchu 2 konštrukcie. Prostredníctvom týchto pomocných hodnôt môžu byť rovnice (2.3) a (2.4) prepísané do jednoduchšej formy, kde sú vzťahy zahrnujúce teploty v časovom kroku j+1 napísané na ľavej strane a hodnoty uvedené explicitne. Na pravej strane rovnice sú hodnoty zahrnujúce teplotu v „starom“ časovom kroku j. Pre vnútorný kontrolný objem tak získavame nasledujúci vzťah:

$$-H_i T_{i-1}^{j+1} + (HO_i + H_i + H_{i+1}) T_i^{j+1} - H_{i+1} T_{i+1}^{j+1} = HO_i T_i^j \quad (2.9)$$

Tento výraz môže byť ďalej zjednodušený zavedením koeficientov A, B, C, D, ktorých definícia je na prvý pohľad jasná porovnaním nasledujúceho vzťahu s (2.8) a (2.9).

$$A_i T_{i-1}^{j+1} + B_i T_i^{j+1} + C_i T_{i+1}^{j+1} = D_i \quad (2.10)$$

Pre kontrolné objemy na povrchu konštrukcie (povrch 1) zavádzame:

$$(HO_1 + H_1 + H_2) T_1^{j+1} - H_2 T_2^{j+1} = HO_1 T_1^j + H_1 T_{air} + q_{surf,face1} \quad (2.11)$$

Tento výraz môže byť taktiež zjednodušený zavedením koeficientov B, C a D:

$$B_1 T_1^{j+1} + C_1 T_2^{j+1} = D_1 \quad (2.12)$$

Výrazy z rovníc (2.11) a (2.12) a odpovedajúce výrazy, ktoré možno napísať pre povrch 2, možno zhrnúť do jednej sústavy rovníc, ktorej maticový zápis je nasledujúci (2.13):

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & A_i & B_i & C_i & \\ & & \cdot & \cdot & \\ & & & A_n & B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{j+1} \\ \cdot \\ T_i^{j+1} \\ \cdot \\ T_n^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ \cdot \\ D_i \\ \cdot \\ D_n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Mimo troch hlavných diagonál sú všetky prvky matice tejto sústavy rovníc rovné nule a preto môže byť sústava riešená jednoduchým algoritmom, tzv. tri-diagonálnou metódou [17]. Pri postupe z jedného časového kroku k ďalšiemu sa „nové“ vypočítané teploty stávajú „starými“ pre ďalší časový krok. Týmto spôsobom je možné posúvať výpočet ďalej v čase až kým máme pre každý časový krok znalosti týkajúce sa okrajových podmienok, napr. teploty vzduchu a indukcie tepla radiáciou pre oba povrchy. Aby bolo možné zahájiť výpočet, je v prvom kroku nastavená fixná hodnota teploty (štandardne sú všetky teploty nastavené na hodnotu 20 °C). Výpočet začína s týmito hodnotami a prvý deň v simulačnom období je počítaný toľkokrát, kým nie je dosiahnutá stabilita, t. j. kým nie je zachovaný stabilný 24 hodinový rytmus (kvázi – stacionárny stav).

Veľkosť časového kroku

Za účelom dosiahnutia primeranej presnosti výpočtu, napr. už spomínaného predpokladu zachovania kvázi – stacionárneho stavu medzi uzlovými bodmi, je potrebné obmedziť veľkosť časového kroku aj napriek tomu, že implicitná metóda s príliš veľkými časovými krokmi sama o sebe nevedie k nestabilitám. Toto je napríklad prípad explicitnej metódy používajúcej teploty „starej“ úrovne (2.1). Horný limit časového kroku je daný v bode, kde sú načítavané dáta o počasí v hodinovom intervale, pričom zakaždým sa počíta s minimálne dvoma časovými krokmi. Navyše bolo dohodnuté obmedzenie Fourierovho čísla na stanovenú hodnotu. Pre kontrolný objem môže byť Fourierovo číslo vypočítané nasledovne:

$$R = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (2.14)$$

V BSimu je veľkosť časového kroku zvolená tak, aby pre všetky kontrolné objemy zahrnuté v modeli budovy Fourierovo číslo neprekročilo hodnotu 1,25. Maximálny časový krok teda získame zo vzťahu:

$$(\Delta t)_{max} = \min_{all \text{ control volumes}} \left(1,25 \frac{\rho c_p}{\lambda} (\Delta x)^2 \right) \quad (2.15)$$

Pre porovnanie, kritické Fourierovo číslo je 0,5 pre explicitne výpočtové metódy. Je vidieť, že požiadavky na časový krok sú najkritickejšie pre rovnice obsahujúce tenké vrstvy materiálov v kombinácii s vysokou tepelnou vodivosťou, nízkou hustotou a mernou tepelnou kapacitou. Obzvlášť významná je kvadratická závislosť na hrúbke vrstvy. To znamená, že za každým zmenšením hrúbky rozhodujúceho kontrolného objemu na polovicu musí prebehnúť štvornásobný počet časových krokov. Pri spustení simulácie zobrazí program doporučený počet časových krokov za hodinu a užívateľ by si mal uvedomiť, že rozdiel medzi doporučeným a zvoleným počtom môže spôsobiť zvýšenie nepresnosti vo výpočtu.

Tepelná rovnováha vzduchu v zóne

Tepelná rovnováha vzduchu v zóne nepočíta s vplyvom vlastnej tepelnej kapacity vzduchu, čo znamená, že vzduch sa okamžite prispôsobuje úpravám okolia. Na tepelný stav vzduchu pôsobia nasledujúce vplyvy:

- Tepelné toky z priľahlých konštrukcií
- Tepelné toky tepelnými mostami
- Tepelné toky výplňami otvorov
- Solárna radiácia oknami (predpokladá sa, že do vzduchu je indukované len obmedzené množstvo)
- Príspevok tepla od rôznych systémov a tepelných zdrojov (napr. osoby)
- Vzduch dodaný vetracími systémami
- Prienik vzduchu z vonkajšieho prostredia (infiltrácia, vetranie)
- Vzduch z iných zón dodaný miešaním

Program vždy zaisťuje rovnováhu vzduchu pre každú zónu. To znamená, že objem vzduchu dopraveného do zóny je rovnaký ako objem odvedeného vzduchu. Užívateľom zvolené dáta, ktoré by viedli k nerovnováhe teda spôsobia zvýšenie množstva vzduchu infiltrácie a exfiltrácie tak, aby bola zachovaná rovnováha.

Tepelné toky z vnútorných a vonkajších konštrukcií

Tepelné toky medzi vzduchom a povrchmi príslušných konštrukcií sú vyjadrené pomocou kombinovaných tepelných odporov pri radiácii a vedení tepla. Tento odpor je definovaný pre každý povrch individuálne. Prenesená energia do vzduchu je počítaná zo vzťahu:

$$\Phi_{air, constr} = \sum_{constructions} A_{surf} \frac{T_{surf} - T_{air}}{R_{surf}} \quad (2.16)$$

$\Phi_{air, constr}$ celkový vplyv na vzduch indukovaný zo všetkých povrchov, W

A_{surf} plocha povrchu, m²

T_{surf} teplota povrchu, K (je zhodná s teplotou T_1 v rovnici (2.4))

T_{air} teplota vzduchu v aktuálnej zóne, K

R tepelný odpor pri prestupu tepla pre povrch, m²K/W

Tepelné toky tepelnými mostami

Jedná sa o tepelný tok priamo medzi vzduchom z aktuálnej zóny a vzduchom na opačnej strane konštrukcie obsahujúcej tepelné mosty. To znamená, že sa neberie do úvahy vedenie tepla tepelným mostom a ani jeho akumulčné schopnosti. Pre každú konštrukciu v zóne je počítaný celkový súčiniteľ zvýšenia prechodu tepla vplyvom tepelných mostov vo W/K. Účinky tepelných mostov na vzduch v zóne môžu byť vyjadrené vzťahom:

$$\Phi_{thermal bridges} = \sum_{constructions} \omega_{thermal bridges} \cdot (T_{air, side1} - T_{air, side2}) \quad (2.17)$$

$\Phi_{\text{thermal bridges}}$	celkový účinok prenosu tepla do vzduchu vplyvom tepelných mostov, W
$\omega_{\text{thermal bridges}}$	súčiniteľ tepelnej straty vplyvom tepelných mostov pre danú konštrukciu, W/K
$T_{\text{air, side1}}$	teplota vzduchu pre počítanú zónu, K
$T_{\text{air, side2}}$	teplota vzduchu na opačnej strane konštrukcie, K

Tepelné toky výplňami otvorov

U výplni otvorov sa nepočíta s ich tepelnou kapacitou a tepelné toky cez tento typ konštrukcií sa počíta medzi dvoma uzlami na každej strane konštrukcie. Tepelný tok zo zóny 1 do zóny 2 cez výplň otvoru (môže byť kladný alebo záporný) sa počíta zo vzťahu:

$$\Phi_{\text{air,win/door}} = \sum_{\text{windows+doors}} A_{\text{win/door}} \cdot U_{\text{win/door}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.18)$$

$\Phi_{\text{air,win/door}}$	celkový účinok prenosu tepla cez okná a dvere, W
$A_{\text{win/door}}$	plocha výplne otvoru, m ²
$U_{\text{win/door}}$	súčiniteľ prestupu tepla výplne, W/m ² K
T_1 a T_2	teploty vzduchu v zónach 1 a 2 na oboch stranách príslušnej konštrukcie, K

Zóna na strane povrchu 2 je často virtuálnou zónou (vonkajšie prostredie), ale princíp výpočtu je rovnaký aj pre vnútorné okná a dvere. Hodnota súčiniteľa prestupu tepla U sa vypočíta na základe pomeru plôch z hodnôt U skla a rámu.

Slnečná radiácia

Dopadajúce slnečné žiarenie je v každej zóne rozložené medzi povrchy a vzduch tak, ako je uvedené v nastavení tepelnej zóny, v menu „Solar distribution“. Účinok slnečného žiarenia na vzduch v zóne sa počíta zo vzťahu:

$$\Phi_{\text{air,sol}} = f_{\text{sol-air}} \Phi_{\text{sol}} \quad (2.19)$$

$\Phi_{\text{air,sol}}$	účinok slnečnej radiácie indukovaný do vzduchu v zóne, W
$f_{\text{sol-air}}$	zlomok slnečnej radiácie, ktorý pripadá na vzduch
Φ_{sol}	celkové účinky slnečnej radiácie indukované do zóny, W

Výpočet celkových účinkov slnečnej radiácie Φ_{sol} je popísaný v [18, 19, 20].

Vzduch dopravovaný do zóny

Vzduch dopravený do zóny (kladným alebo záporným smerom) môže pochádzať zo štyroch odlišných typov „systémov“, a to: zmiešavanie, infilácia, vetranie a nútené (mechanické) vetranie. Účinky každého z týchto systémov na tepelnú rovnováhu vzduchu závisia na sile prúdenia a teplote vzduchu, ktorý je dopravovaný do zóny. V tepelnej rovnováhe je každá podmienka stanovená individuálne. Výpočet umožňuje rôzne zmeny stanovené zoznamom jednotlivých systémov.

$$\Phi_{air,vent} = n_{vent} V (\rho c_p) (T_{vent} - T_{air}) \quad (2.20)$$

$\Phi_{air, vent}$ teplo dopravené vetracím vzduchom, W

n_{vent} výmena vzduchu v zóne, s^{-1}

V objem zóny, m^3

ρ hustota vzduchu, kg/m^3

c_p merná tepelná kapacita vzduchu, $J/kg K$

Predpokladá sa konštantná hodnota hustoty vzduchu odpovedajúca teplote $15\text{ }^{\circ}C$ a aktuálnej nadmorskej výške. Vplyv aktuálnej teploty vzduchu na zmenu jeho hustoty sa teda zanedbáva.

Vplyv tepla od systémov

Tieto vplyvy pochádzajú od nasledujúcich systémov: ľudia, vybavenie, osvetlenie, vykurovanie alebo klimatizačné systémy v zóne. Vplyv týchto systémov na vzduch v zóne závisí na definovanom programe vráťanie ovládania, ktoré má za úlohu udržať požadovanú tepelnú podmienku. Pri popise systémov taktiež definujeme, aký veľký podiel tepelnej straty je indukovaný do vzduchu a aký veľký podiel je indukovaný do povrchov v zóne. Rozsah tepelnej straty všetkých systémov je v nasledujúcej rovnici označený $\Phi_{air, syst.}$.

Celková tepelná rovnováha zóny

Celková tepelná rovnováha v zóne môže byť teraz definovaná podmienkou, že suma všetkých vyššie spomenutých tepelných vplyvov musí byť rovná nule. Pri stacionárnom výpočte nebude teplo akumulované vo vzduchu. Na základe toho môže byť pre výpočet teploty vzduchu v aktuálnom časovom kroku zostavená nasledujúca rovnica:

$$\begin{aligned} T_{air} \left[\sum_{constructions} \frac{A_{surf}}{R_{surf}} + \sum_{windoor} A_{windoor} U_{windoor} + V(\rho c_p)_{air} [n_{outdoor} + \right. \\ \left. \sum_{zones} n_{zones}] \right] = \sum_{constructions} \frac{A_{surf}}{R_{surf}} + \sum_{windoor} A_{windoor} U_{windoor} + \\ V(\rho c_p)_{air} [n_{outdoor} T_{outdoor} + \sum_{zone} n_{zone} T_{zone}] + \\ \Phi_{air,sol} + \Phi_{air,vent} + \Phi_{air,syst} + \Phi_{thermal\ bridges} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Spojenie prenosu tepla v konštrukciách a tepelnej bilancie zóny

Výpočet tepelných tokov v konštrukciách predpokladá znalosť teplôt všetkých priľahlých zón a výpočet teplôt vzduchu v zónach predpokladá okrem iného znalosť povrchových teplôt všetkých konštrukcií. Táto vzájomná závislosť by mohla zvädzať k vytvoreniu veľkej sústavy rovníc, v ktorej by boli všetky teploty vzduchu a rozloženia teplôt v konštrukciách riešené na jeden záťah. To je síce teoreticky možné, ale nie príliš účelné, pretože takto vzniknutá matica nie je tri-diagonálna ako v prípade (2.13). Metódy na riešenie takejto sústavy rovníc sú pre tento účel považované za príliš zložité. Dostatočná presnosť môže byť dosiahnutá nasledujúcim postupom:

- Teplota vzduchu každej zóny je počítaná na základe príspevku tepla v aktuálnom časovom kroku a straty tepla prenosom cez povrchy konštrukcií v predchádzajúcom kroku.
- Na základe vypočítaných teplôt vzduchu je prebieha nestacionárny výpočet z teplotných podmienok konštrukcie
- Výpočet teploty vzduchu z (2.16) je opakovaný s tepelnými stratami prestupom, ktoré sú dané novým rozložením teplôt v konštrukcií.

Týmto spôsobom sú tepelné bilancie zón počítané dvakrát pre každý časový krok. Popísaná procedúra nasleduje po zvolení „optimalizovanej simulácie“ v karte možnosti v rozhraní tsbi5. Výpočet teploty vzduchu zóny podľa (2.18) je vylúčený v prípade, že je zvolený jednoduchý výpočet.

Výpočet teploty skla

U výplní otvorov sa predpokladajú vždy dve vrstvy skla. Ich pohltivosť je SA_i a odrazivosť je SR_i (neplatí pre sklo s náterom). Tieto predpoklady sú platné pre výplne s jedným alebo dvoma sklami, nie však pre väčší počet vrstiev skla.

Pri výpočte pohltenej množstva žiarenia je pri výpočte uvažovaná odlišná pohltivosť a odrazivosť na dvoch sklenených povrchoch ako:

$$q_{abs,i} = I_i(1 - SR_i) \cdot SA_i + I_j \left((1 - SR_j) \cdot SA_j \right)^2 \quad (2.21)$$

V prípade, že je známa len celková pohltivosť (SA) a odrazivosť (SR), môžu byť tieto hodnoty zadane ako vstup pre povrch 1 v nastaveniach výplne. BSim potom predpokladá, že pohltivosť a odrazivosť je pre obe vrstvy skla rovnaká a ich veľkosť je polovica zo zadanej hodnoty. Za tohto predpokladu sa potom množstvo pohltenej žiarenia vypočíta takto:

$$q_{abs,0} = I_1 \left(1 - \frac{SR}{2} \right) \frac{SA}{2} + I_0 \left(\left(1 - \frac{SR}{2} \right) \frac{SA}{2} \right)^2 \quad (2.22)$$

Predpokladá sa, že dlhovlnné žiarenie dopadajúce na sklo sa odrazí, čo je z fyzikálneho hľadiska správne pre klasické stavebné sklo, nie však pre tenké povlaky, ako napr. teflon alebo plast. I_1 a I_0 v rovnici (2.22) reprezentuje žiarenie s krátkymi vlnovými dĺžkami dopadajúcimi na povrch 0 resp. povrch 1 výplne. Krátkovlnné žiarenie dopadajúce na sklo zo strany exteriéru sa skladá z viacerých zložiek (viď (2.23)). Na strane tepelnej zóny sa krátkovlnné žiarenie skladá z viditeľného svetla a prepusteného slnečného žiarenia.

$$I = I_{direct} + I_{diffuse,sky} + I_{diffuse,reflect} \quad (2.23)$$

I_{direct}	Priame slnečné žiarenie dopadajúce na sklo, W/m ²
$I_{diffuse,sky}$	Nepriame žiarenie oblohy dopadajúce na sklo, W/m ²
$I_{diffuse,reflect}$	Nepriame odrazené žiarenie dopadajúce na sklo, W/m ²

Z tepelnej bilancie teplôt vzduchu v okolí skleneného povrchu a množstva pohltenej energie v samotnom skle môžeme vypočítať teplotu povrchu skla:

$$t_{g,i} = UR_i(\Theta_1 - \Theta_0) - q_{abs,i}R_i + \Theta_i \quad (2.24)$$

$t_{g,i}$	Teplota povrchu skla, °C
Θ_1	Teplota vzduchu na strane povrchu 1, °C
Θ_2	Teplota vzduchu na strane povrchu 0, °C
Θ_i	Teplota vzduchu na strane povrchu, ktorého teplota je počítaná, °C
R_i	Tepelný odpor pri prestupu tepla, m ² .K/W
U	Súčiniteľ prestupu tepla skla, W/(m ² .K)

Pri výmene žiarenia s veľkými vlnovými dĺžkami medzi sklenenými a okolitými povrchmi sa pre všetky sklenené povrchy uvažuje priemerný súčiniteľ emisivity $\varepsilon = 0,94$.

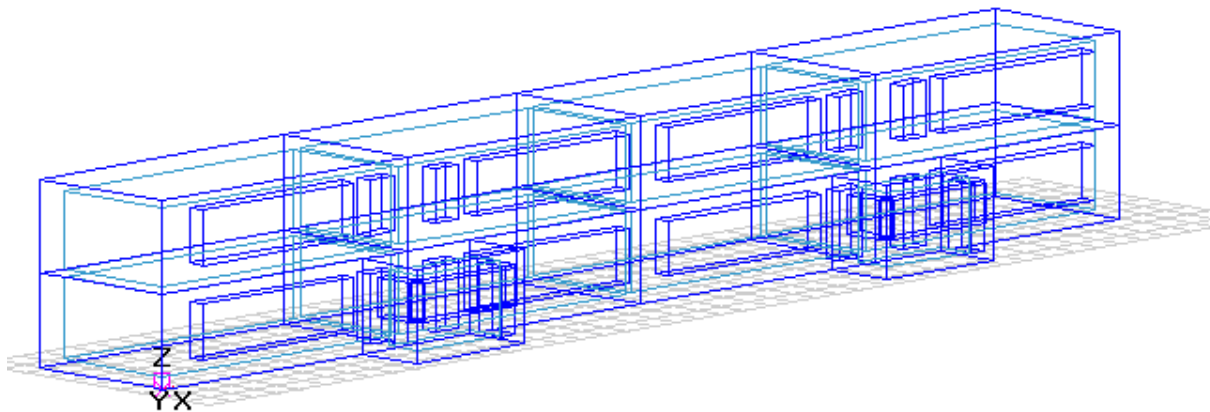
2.2.2 Popis tvorby modelov

Okrajové podmienky výpočtu tvoria klimatické dáta [22] pre mesto Srinagar cca 200 km západne od dediny Mulbekh. Jedná sa o najbližšie miesto s dostupnými klimatickými údajmi. Klimatické podmienky sú podobné ako v dedine Mulbekh s tým, že v oblasti Srinagaru je vyšší ročný úhrn zrážok. Výsledky simulácií by mali byť preto menej priaznivé. Vlastnosti konštrukcií aplikované v modeli sú popísané na začiatku kap. 2.2.

Model budovy školy

Model budovy školy je jednoduchý a jeho 3D zobrazenie je na obr. 2.12. Objekt tvorí osem učební a dve vstupné predsieňe, z ktorých sú vstupy do jednotlivých učební. Do učební na poschodí sú vstupy zo severnej strany po schodisku.

Model bol rozdelený na osem tepelných zón, každá učebňa tvorí jednu zónu. Hranice medzi zónami tvoria stropy a steny, medzi jednotlivými učebňami nie je žiadny otvor, takže nedochádza k miešaniu vzduchu medzi zónami. Svetelné zdroje tvoria úsporné žiarivky so zanedbateľnou produkciou tepla. Taktiež nie je inštalovaný žiadny iný zdroj tepla ani chladu. Systémy, s ktorými sa v zóne počítalo, sú infiltrácia a ľudia. Infiltrácia je nastavená celodenne a s ohľadom na netesnosť obálky budovy je počítaná s vyššou hodnotou 0,8 h⁻¹. Kapacita každej učebne je 32 žiakov a jeden vyučujúci. Počíta sa s výukou v pracovné dni od 8 do 17 h. Obsadenosť osobami je teda 33 osôb v čase 8-17 h v pracovné dni a zvyšok času je budova bez ľudí. Produkcia tepla od osoby je 72 w/h. Bude simulovaná situácia bez započítania vetrania a taktiež s vplyvom vetrania a pod.



Obr. 2.12: 3D model budovy školy

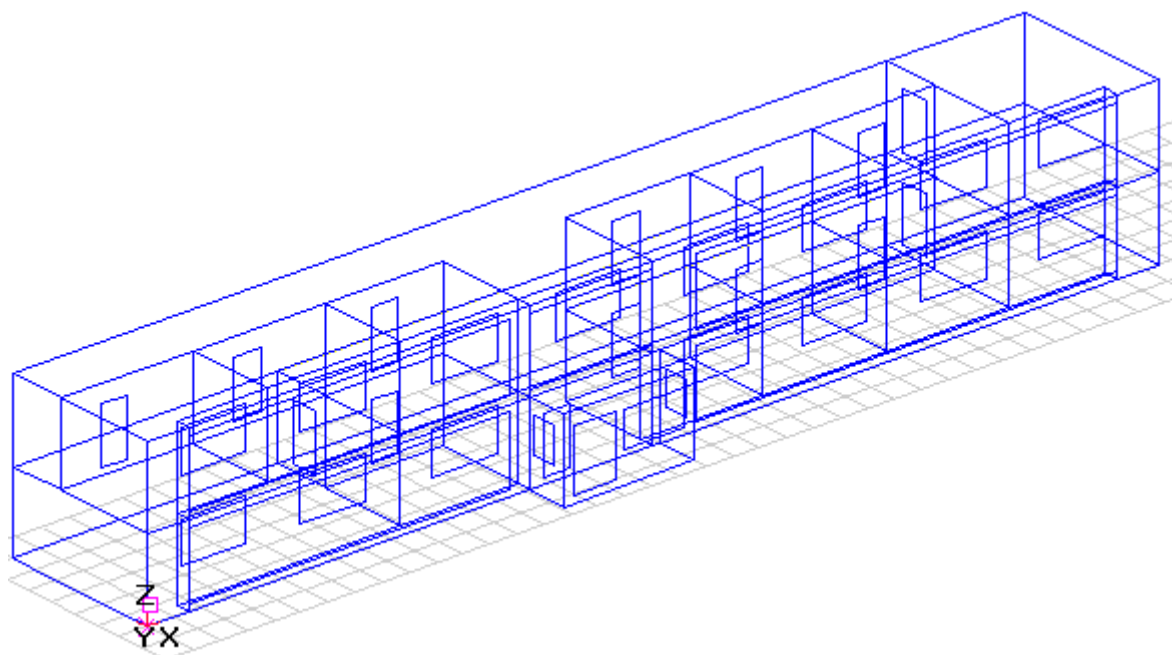
Model školského internátu

Budova internátu je zložitejšia a model je zobrazený na obr. 2.13. Objekt tvorí vstupná predsieň, chodby, šesť miestností pre ubytovanie žiakov, hosťovská miestnosť, miestnosť pre správcu internátu, sklad, dve kúpeľne a spoločenská miestnosť. V každej miestnosti sa ubytuje šesť žiakov s výdajom tepla 72 W/h. Počíta sa celoročná prevádzka, žiaci sa budú v internáte zdržiavať mimo výuky. Miestnosť pre hosťov bude používaná príležitostne a model uvažuje s prespaním dvoch osôb na noc. Miestnosť pre správcu bude obsadená len samotným správcom. Kúpeľne budú používané v čase 21-22 h a to vždy šiestimi žiakmi naraz. V simulácii sa uvažuje s neustálym pobytom jednej osoby v karanténe. Zvláštnosťou je spoločenská miestnosť (označené „Activity hall“), kde sa predpokladá prítomnosť takmer celého internátu (30 osôb) v podvečerných hodinách (17-21 h). Tiež sa počíta so zvýšenou fyzickou aktivitou osôb v miestnosti s tepelným výdajom 120 W/h na osobu a produkciou vodnej pary 123 g/h. Vzduch zo spoločenskej miestnosti bude premiešavaný so vzduchom v chodbe. Infiltrácia je uvažovaná celoročne a opäť je počítané so zvýšenou hodnotou $0,8 \text{ h}^{-1}$. Osvetlenie je vzhľadom k nízkemu tepelnému výdaju zanedbané.

Solárna stena (priestor medzi stenou a zasklením) bol modelovaný ako miestnosť, ktorá hraničí na jednej strane s virtuálnou zónou exteriéru a na druhej strane s interiérom. Tento priestor tvorí zónu „solar wall“, v ktorej sa počíta len s infiltráciou vzduchu. Chodby tvoria taktiež jednu zónu, nakoľko je v nich vzduch plne premiešavaný cez schodisko. Zvyšné miestnosti tvoria samostatné tepelné zóny s nastavením systémov tak, ako bolo popísané vyššie.

Pre stav vnútorného prostredia v budovách je rozhodujúce slnečné žiarenie. V oboch objektoch sa predpokladá nasledujúce rozloženie slnečného žiarenia:

- 55 % na podlahy
- 30% na steny
- 15 % na stropy



Obr. 2.13: 3D model školského internátu

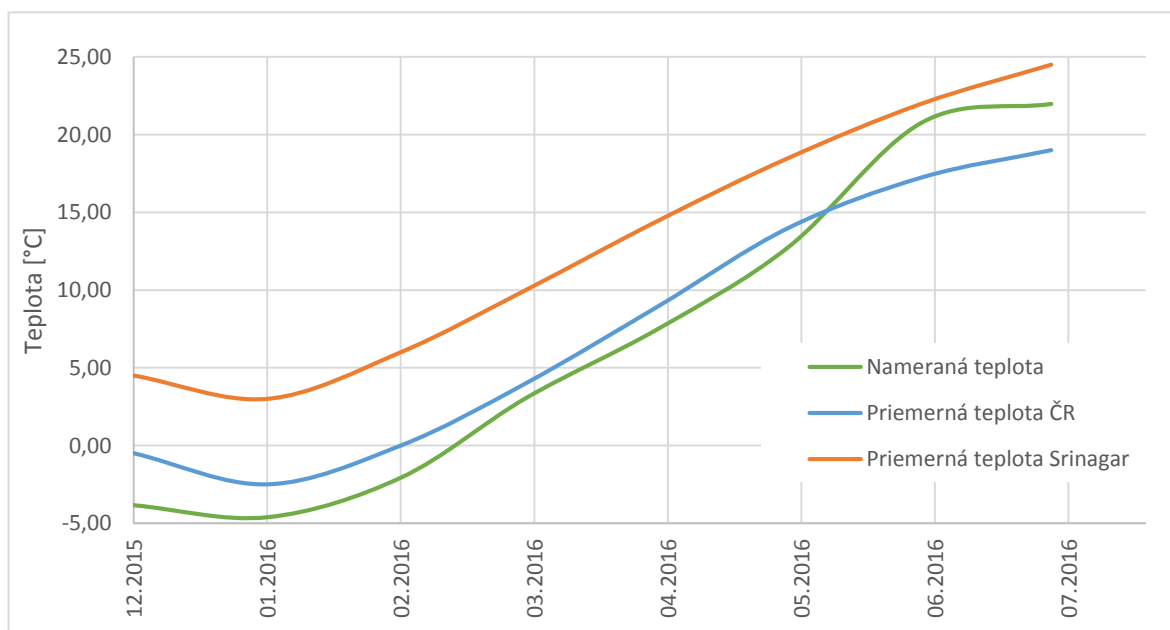
3 Hodnotenie na základe meraní

Ako už bolo spomenuté v kap. 2.1.2, meranie bolo spustené 6.12.2016 a malo prebiehať kontinuálne počas 365 dní s tým, že každý mesiac budú miestni sťahovať dáta z čidiel a posielat' ich elektronicky. Bohužiaľ vznikli počas merania problémy, ktoré sa aj napriek veľkej snahe nepodarilo odstrániť. Z nezistených príčin prestal 18.12.2016 luxmeter zaznamenávať hodnoty osvetlenosti. Tento problém sa nepodarilo vyriešiť ani turistom z ČR, ktorí boli v lete prítomní na škole. Ďalej chýbajú údaje z 12 čidiel pre obdobie od 17.5.2016 do 7.6.2016, pravdepodobnou príčinou je plná pamäť. Posledné dostupné záznamy zo všetkých čidiel sú z 13.7.2016. Od tohto dátumu až po súčasnosť už dáta nie sú dostupné, problém sa nepodarilo miestnym odstrániť. Údaje v tejto kapitole preto vychádzajú z dostupných nameraných hodnôt.

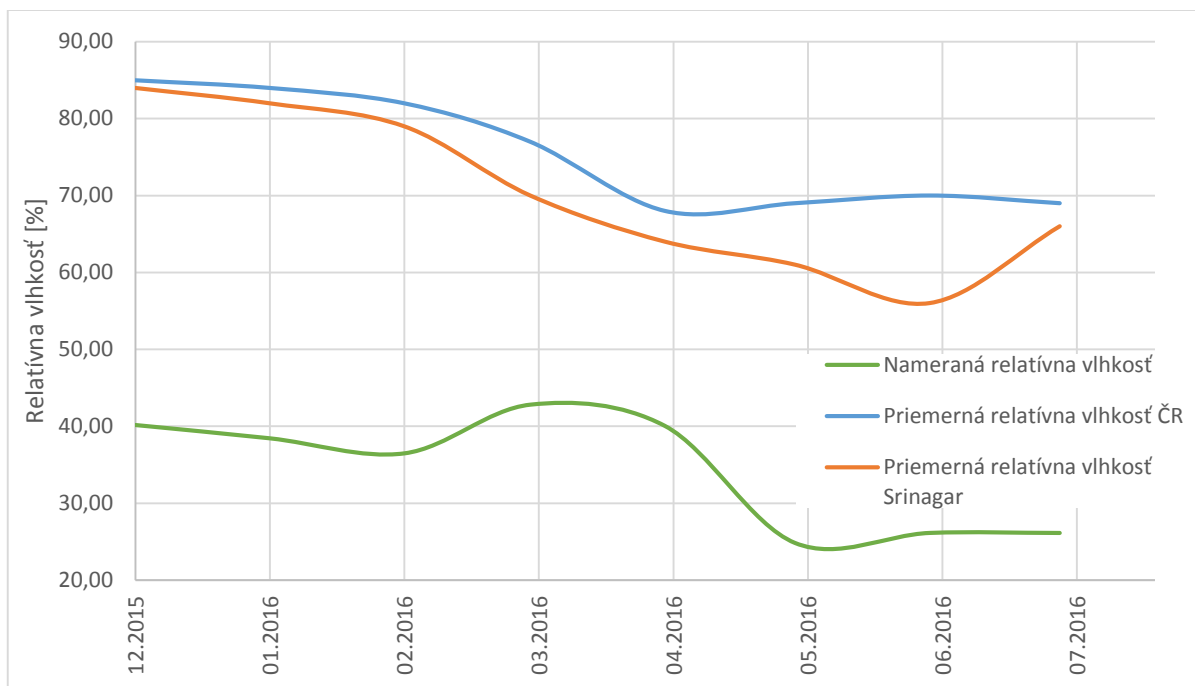
3.1 Klimatické data

Grafy na obr. 3.1 a 3.2 znázorňujú priebeh priemernej mesačnej teploty a relatívnej vlhkosti. Tento vznikol ako výstup z merania teplomeru a vlhkomeru označeného v tab. 2.1 ako „Exterior“. Pre porovnanie sú uvedené aj dlhodobé priemerné hodnoty, pochádzajúce z údajov v [2, 3, 23]. Teploty sú o niečo nižšie ako teploty udávané ako dlhodobý priemer pre ČR. Porovnaním s grafom na obr. 1.2 možno obdobie hodnotiť ako priemerné s teplotami mierne nižšími. Zaujímavý je hlavne priebeh priemernej relatívnej vlhkosti, ktorý je polovičný oproti priemeru udávanému pre mesto Srinagar. Jedná sa totiž o nižšie položené mesto s vyšším počtom zrážok ako priamo v Mulbekhu. Dlhodobý priemer pre ČR je ešte o niečo vyšší a pohybuje sa v rozmedzí 65 až 90 %.

Najchladnejším mesiacom v sledovanom období bol január, čo korešponduje s dlhodobými priemernými klimatickými údajmi. Nameraná priemerná teplota je $-4,61^{\circ}\text{C}$, čo je takmer na hranici dlhodobého priemerného minima. Najteplejším mesiacom bol mesiac júl s priemernou teplotou takmer 22°C . Priemerná relatívna vlhkosť sa pohybuje okolo 40 % v zimnom období a v suchom letnom období klesá pod hranicu 30 %.



Obr. 3.1: Priemerné mesačné teploty

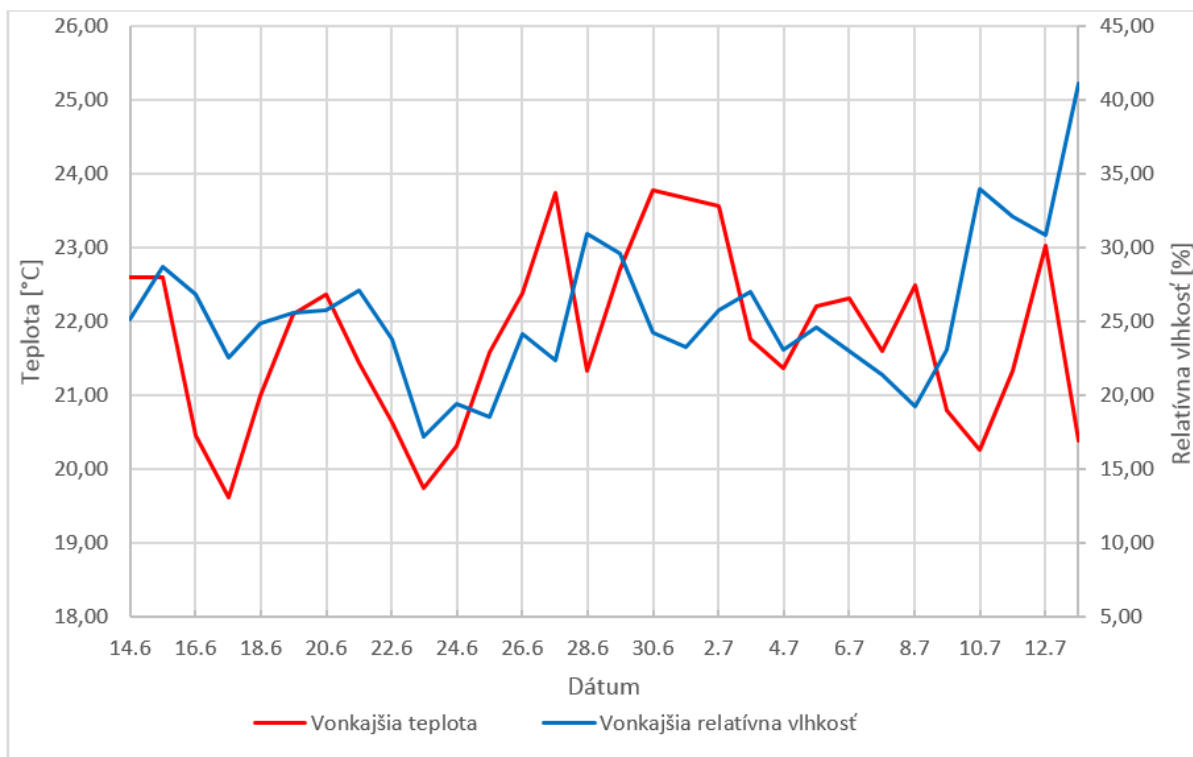


Obr. 3.2: Priemerná vonkajšia relatívna vlhkosť

Grafy na nasledujúcich obrázkoch ukazujú priebehy teplôt a relatívnych vlhkostí v chladnom období (obr. 3.3) a v teplom letnom období (obr. 3.4). Priemerná denná teplota sa v januári drží pod bodom mrazu, pričom za najchladnejšie možno označiť obdobie od 20.1. do 25.1. kedy boli teploty podpriemerne nízke. Vplyvom nízkej relatívnej vlhkosti v letnom období sa priemerná denná teplota pohybovala v rozpätí 19 °C až 24 °C. Za najteplejšie možno označiť obdobie od 27.6. do 3.7. V tomto období bola zároveň nameraná najvyššia vonkajšia teplota (30,6 °C) a taktiež najvyššia teplota interiéru, konkrétne 2.7. v budove školy (28,5 °C).



Obr. 3.3: Priemerné vonkajšie denné teploty a relatívne vlhkosti v januári 2016



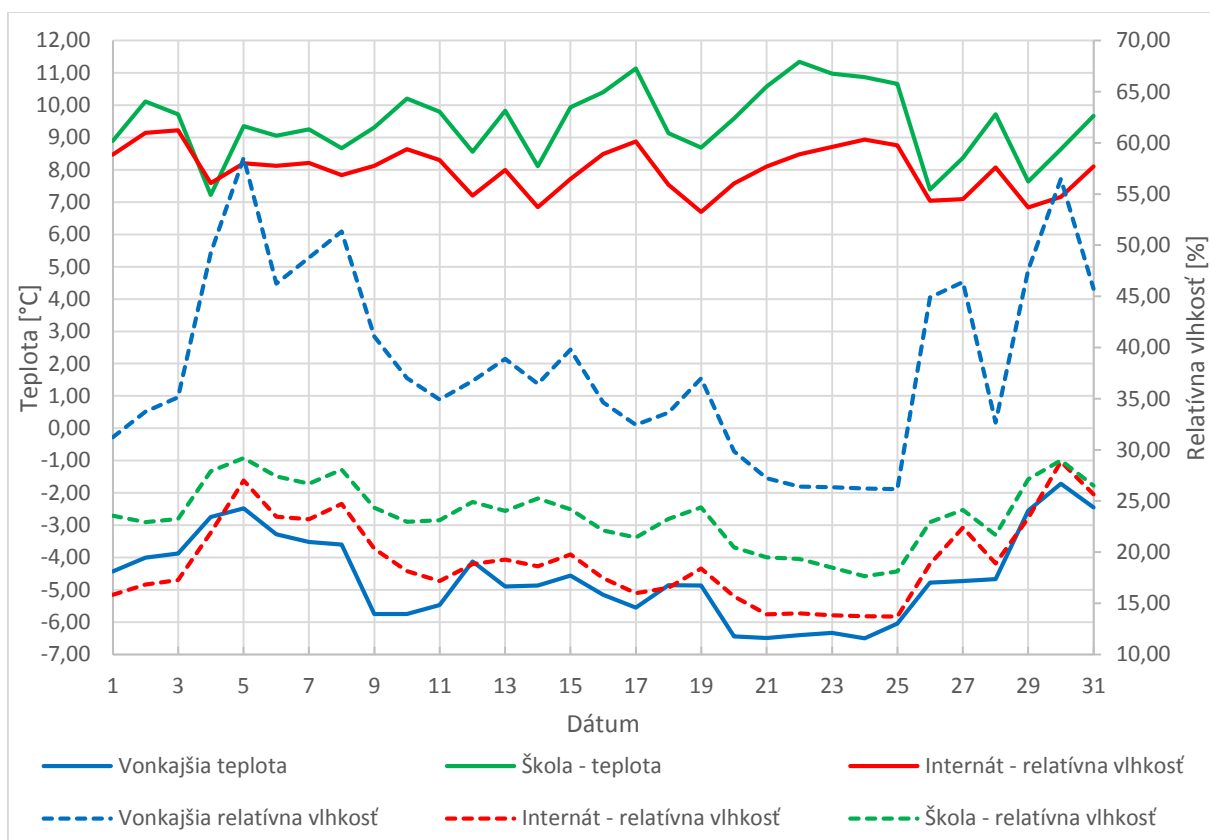
Obr. 3.4: Priemerná vonkajšia teplota a relatívna vlhkosť v letnom období 2016

3.2 Vnútorné prostredie

V tejto kapitole sú uvedené výstupy z meraní, ktoré prebiehali v interiéri budov. Zameral som sa hlavne na obdobia spomenuté v predchádzajúcej kapitole, nakoľko sa jedná o extrémne obdobia a zvyšok možno považovať za obdobie s priaznivejšími hodnotami. Pri hodnotení závislosti vnútorných teplôt vzduchu a povrchových teplôt na osvetlenosti som musel vychádzať len z dostupných nameraných údajov, čiže z prvých dvanástich dní merania.

3.2.1 Zimné obdobie

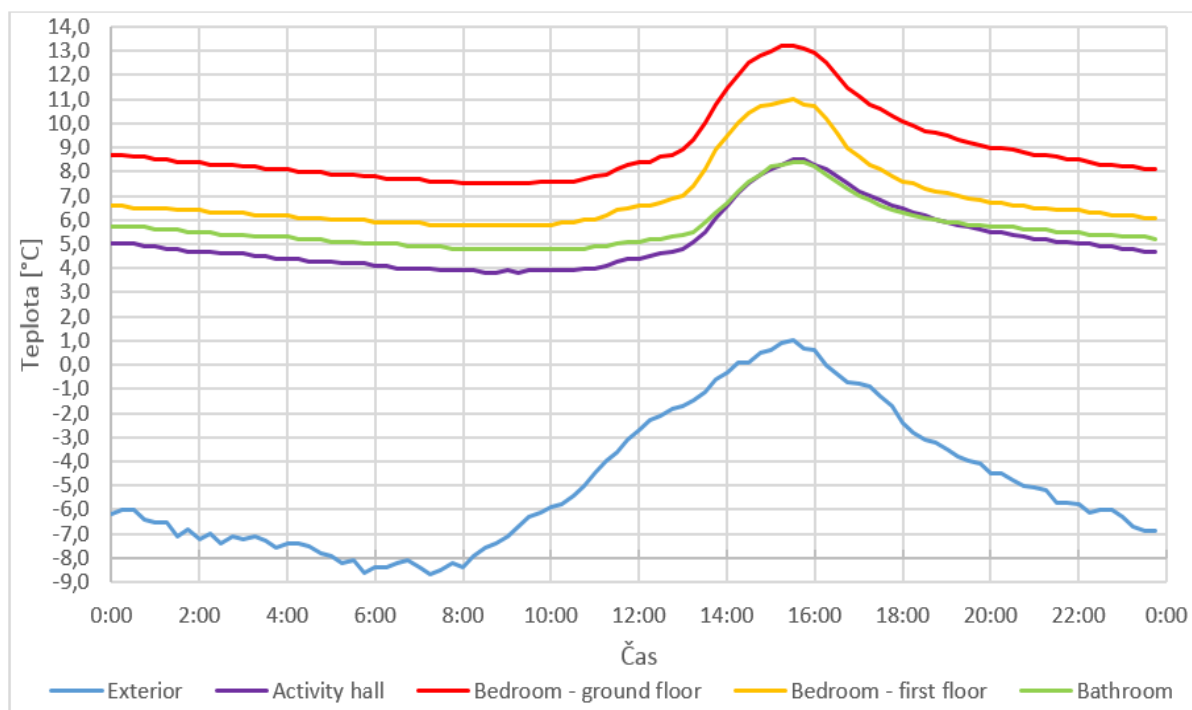
Graf na obr. 3.5 ukazuje priebeh priemerných denných teplôt a relatívnej vlhkosti v zimnom období (január). V priemere je teplota vzduchu v škole vyššia ako v internáte. V čase merania však internát nebol dokončený, boli nedoriešené rôzne konštrukčné detaily, preto sa budova vyznačovala vyšším počtom tepelných mostov. Naproti tomu sa v škole vyučovalo v určitých učebniach, takže teplota je zároveň ovplyvnená tepelnými ziskmi od osôb, čo sa odzrkadľuje aj na vyššej relatívnej vlhkosti. Najvyššie teploty vzduchu v interiéri boli namerané práve v najchladnejšom období okolo 22.1. Na základe nízkej vonkajšej relatívnej vlhkosti možno usúdiť, že práve tieto dni mali najväčší čas slnečného svitu. Túto úvahu však nemožno potvrdiť, pretože v tomto čase už luxmeter nefungoval. Naopak, najnižšie teploty vzduchu interiéru boli namerané pri vyššej relatívnej vlhkosti vonkajšieho vzduchu, kedy bolo pravdepodobne zamračené a tepelné zisky od slnečnej radiácie boli najnižšie. Ukazuje sa teda závislosť vnútornej mikroklimy od slnečného žiarenia a obsadenosti osobami.



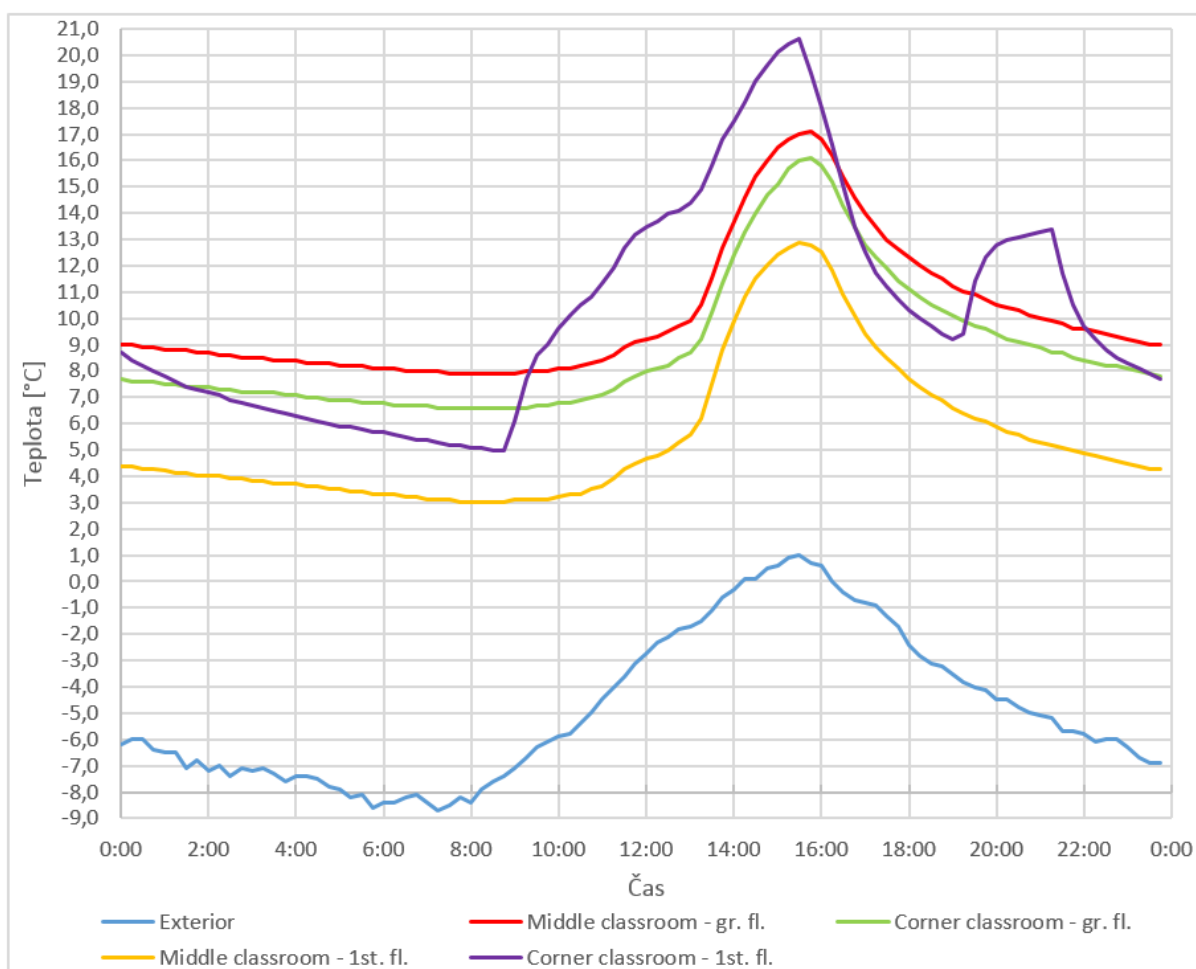
Obr. 3.5: Priemerné teploty a relatívne vlhkosti vzduchu interiéru v januári

Priebeh teplôt v jednotlivých miestnostiach ukazujú grafy na obr. 3.6 a 3.7. Jedná sa o meranie zo dňa 19.1. V tento deň bola priemerná teplota vzduchu v internáte najnižšia. Najchladnejšou miestnosťou v internáte je miestnosť „Activity hall“, ktorá má najväčšiu ochladzovanú plochu a zároveň najväčšiu plochu okien. Miestnosti určené na spanie majú prijateľnejšie teploty, pričom miestnosti na prízemí sú o cca 2 °C teplejšie, čo je opäť spôsobené nižším podielom ochladzovaných plôch. Vidieť nárast teploty hlavne v poobedňajších hodinách vplyvom slnečnej radiácie. V škole bola naopak teplota v tento deň vyššia, a to hlavne z dôvodu prebiehajúcej výuky v rohovej učebni na prvom poschodí. Bez prítomnosti osôb na škole sa jedná o najchladnejšiu učebňu. Od druhej polovice januára tu prebiehala výuka informatiky, ktorej sa zúčastnilo cca 12 študentov a dvaja vyučujúci. Učebňa bola teda naplnená z polovice, no napriek tomu vidieť výrazný vplyv tepelného výdaja osôb a techniky (počítače) na vnútornú teplotu vzduchu. Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti počas tohto dňa je na obr. 3.8. Pokles relatívnej vlhkosti v obedňajších hodinách je spôsobený vetraním v čase neprítomnosti študentov, teplota však naďalej rastie vplyvom slnečnej radiácie. Vo večerných hodinách sú v učebni prítomní vyučujúci pripravujúci učebňu na ďalší deň, takže nastáva opätovný nárast teplôt a vlhkosti. Bez prítomnosti osôb sú teplejšie učebne na prízemí, najchladnejšími sú rohové učebne, kde je najvyšší podiel ochladzovaných plôch.

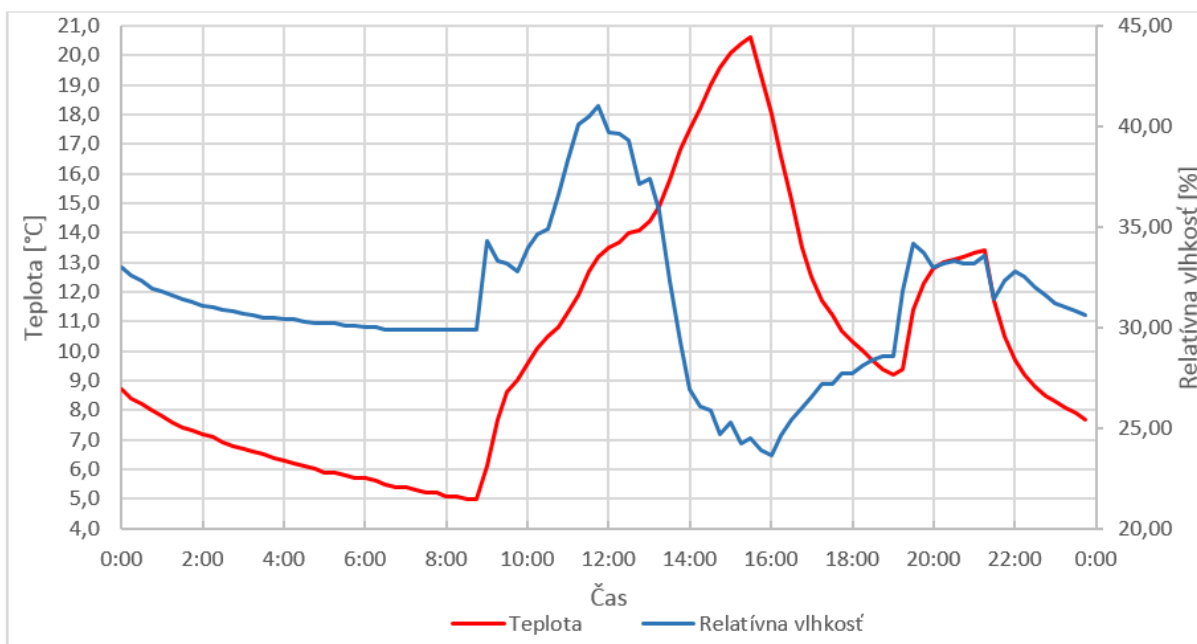
U učebni je vidieť podobný teplotný priebeh počas dňa ako v internáte s tým rozdielom, že nárast a pokles teploty vzduchu v priebehu dňa je väčší. Akumulačná schopnosť internátu je teda vyššia, avšak teploty vzduchu nedosahujú tak vysokých hodnôt ako v prípade školy. Na druhú stranu, pokles teplôt v nočných hodinách je menší a prostredie je teda prijateľnejšie.



Obr. 3.6: Priebeh vnútorných teplôt vzduchu v internáte, 19.1.2016

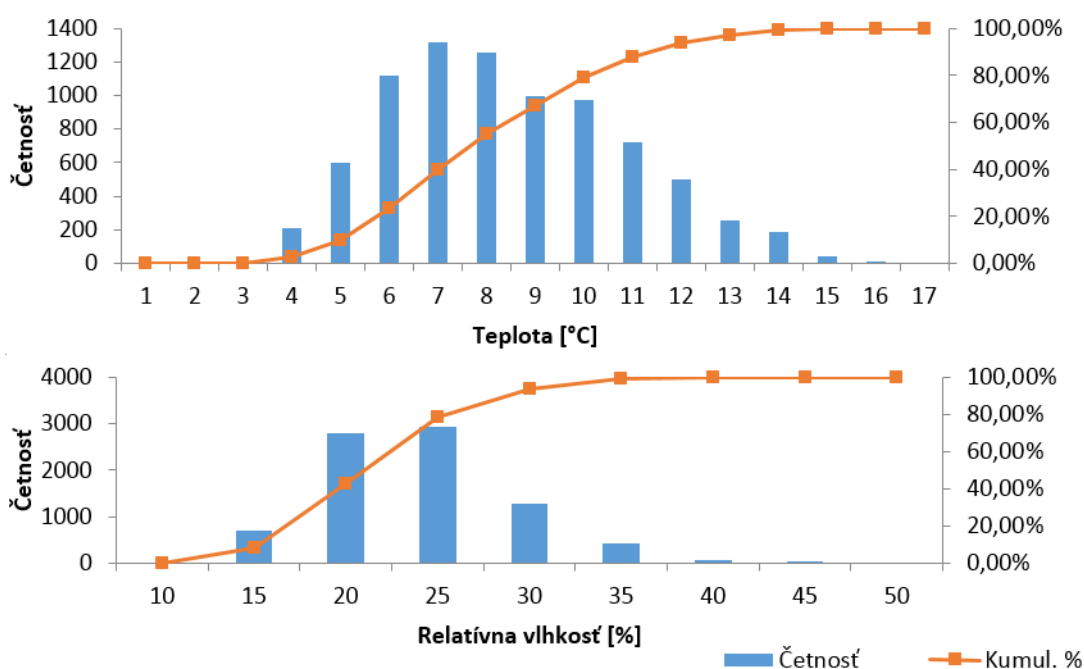


Obr. 3.7: Priebeh vnútorných teplôt vzduchu v budove školy, 19.1.2016



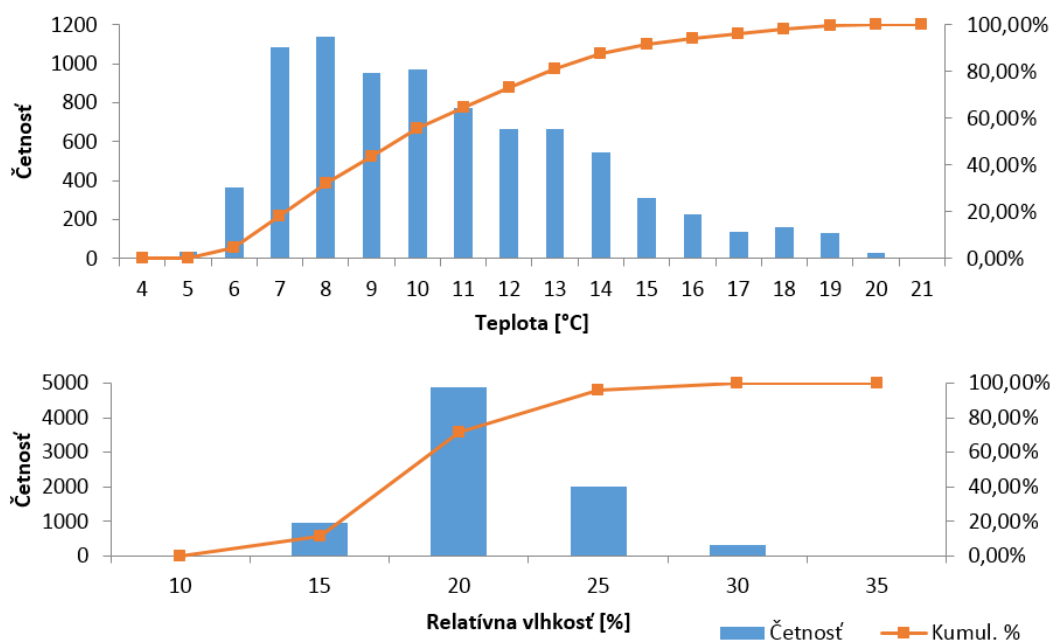
Obr. 3.8: Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v najchladnejšej učebni

Obr. 3.9 ukazuje histogramy vychádzajúce z priebehu teplôt (horný histogram) a relatívnych vlhkostí (spodný) vzduchu nameraných počas zimného obdobia, teda počas najchladnejších mesiacov december až február. Každý z nich vychádza z celkovo 8200 nameraných hodnôt v najchladnejšej miestnosti školského internátu. Vidieť, že vo väčšine prípadov sa teplota vzduchu pohybovala od 6 °C do 10 °C. Podľa kap. 1.2.2 sa pri týchto teplotách pohybuje PPD v rozmedzí 40 % až 70 %. Požadovaná teplota vzduchu 13 °C odpovedajúca PPD 20 % bola dosiahnutá len v necelých troch percentách prípadov. Optimálny rozsah relatívnej vlhkosti (viď kap. 1.2.1) je dosiahnutý len u necelých 32 % prípadov. Z hľadiska teploty vzduchu možno teda prostredie v miestnosti vyhodnotiť ako nevyhovujúce.



Obr. 3.9: Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Activity Hall, december – február

Pre porovnanie sú na obr. 3.10 histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu pre miestnosť v prvom podlaží určenú na spanie študentov. Vidieť, že teplota vzduchu sa najčastejšie pohybuje opäť v rozmedzí 6 °C až 10 °C, avšak percentuálne sú viac zastúpené vyššie teploty. Požadovaná teplota 13 °C (PPD = 20%) bola dosiahnutá v takmer 20 % prípadov a vyše polovicu zimného obdobia bola teplota v miestnosti nad hranicou 10 °C (PPD = 40%). Relatívna vlhkosť nikdy neprekročila hodnotu 30 %. Z hľadiska požiadaviek na vnútorné prostredie je teda internát nevyhovujúci, avšak porovnaním s hodnotami uvedenými na začiatku kap. 1.2 a s prihliadnutím na to, že v čase meraní nebola budova úplne dokončená ani obsadená osobami možno konštatovať, že vnútorné prostredie je priaznivejšie ako vo väčšine budov v oblasti.



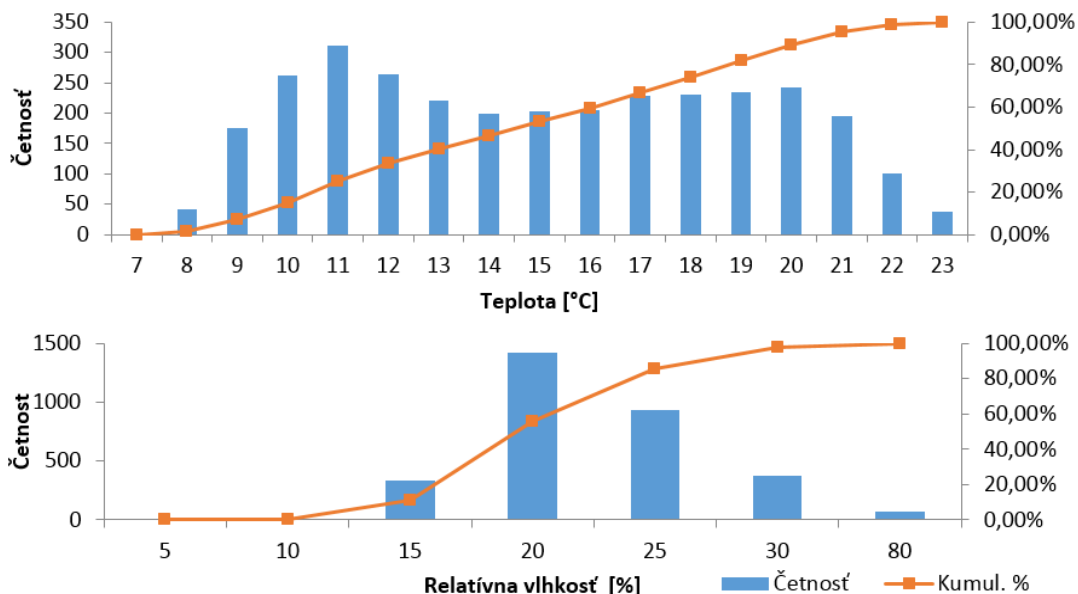
Obr. 3.10: Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Bedroom (1st floor), december – február

Histogramy na obr. 3.11 a 3.12 znázorňujú rozloženie teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu v budove školy, konkrétne v najteplejšej učebni na prízemí (obr. 3.11) a najchladnejšej rohovej učebni na poschodí (obr. 3.12). Vychádzajú z meraní za mesiace december až február, avšak boli odfiltrované len hodnoty namerané v čase výuky, teda od 8:00 do 16:00, nakoľko teplota mimo vyučujúci čas nie je príliš podstatná. Každý histogram je štatistikou celkovo 3150 nameraných hodnôt.

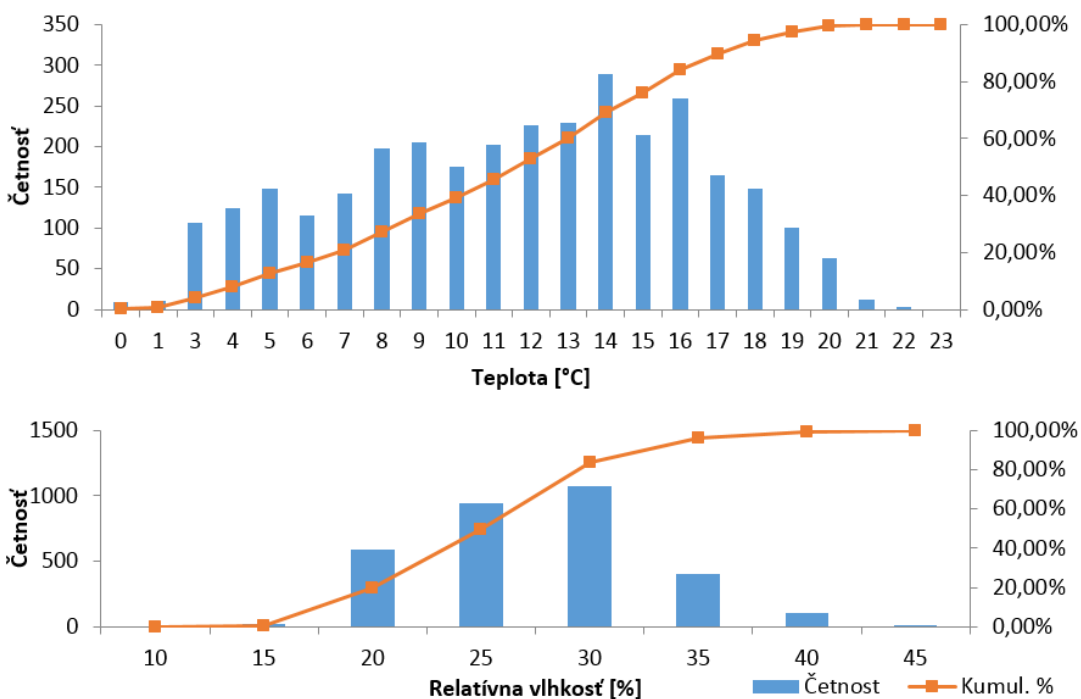
V najteplejšej učebni sa udržiavali počas celej zimy priaznivé hodnoty, v 85 % prípadoch bola teplota vzduchu nad 10 °C a nikdy neklesla pod 7 °C. V 60 % celej zimy bola teplota vyššia ako 13 °C a v 40 % bola teplota vyššia ako 16 °C, kedy je percento nespokojných PPD = 8% a AMV určené na základe stupnice ASHRAE sa pohybuje niekde na hranici hodnoty -0,5. Relatívna vlhkosť väčšinou nedosiahla 30 %, avšak učebňa nebola v zime využívaná, takže počas vyučovania možno očakávať vyššie hodnoty. Na základe subjektívneho vnemu miestnych možno teda vyhodnotiť vnútorné prostredie v učebni ako vyhovujúce.

Naproti tomu v najchladnejšej rohovej učebni je situácia odlišná. Opäť pozorujeme rovnomerné rozloženie teplôt, avšak s výrazne nižšími hodnotami. Polovicu zimy sa udržiavala teplota pod hranicou 13 °C a v najhoršom prípade dokonca klesla až pod bod mrazu.

Nad hranicou 10 °C sa udržiavala teplota vzduchu v takmer 70 % prípadoch. Relatívna vlhkosť dosahovala vyšších hodnôt a nad 30 % stúpala hlavne v čase výuky informatiky, ktorá v učebni prebiehala. Aj keď teploty dosahujú počas dňa podobných hodnôt vo všetkých učebniach, u posudzovanej rohovej miestnosti dochádza k väčšiemu rozptylu teplôt vplyvom veľkého podielu ochladzovaných plôch. Tento jav je vidieť aj z grafu na obr. 3.7, kde sa v čase od polnoci do začiatku výuky ochladzuje rohová miestnosť omnoho rýchlejšie ako ostatné učebne.

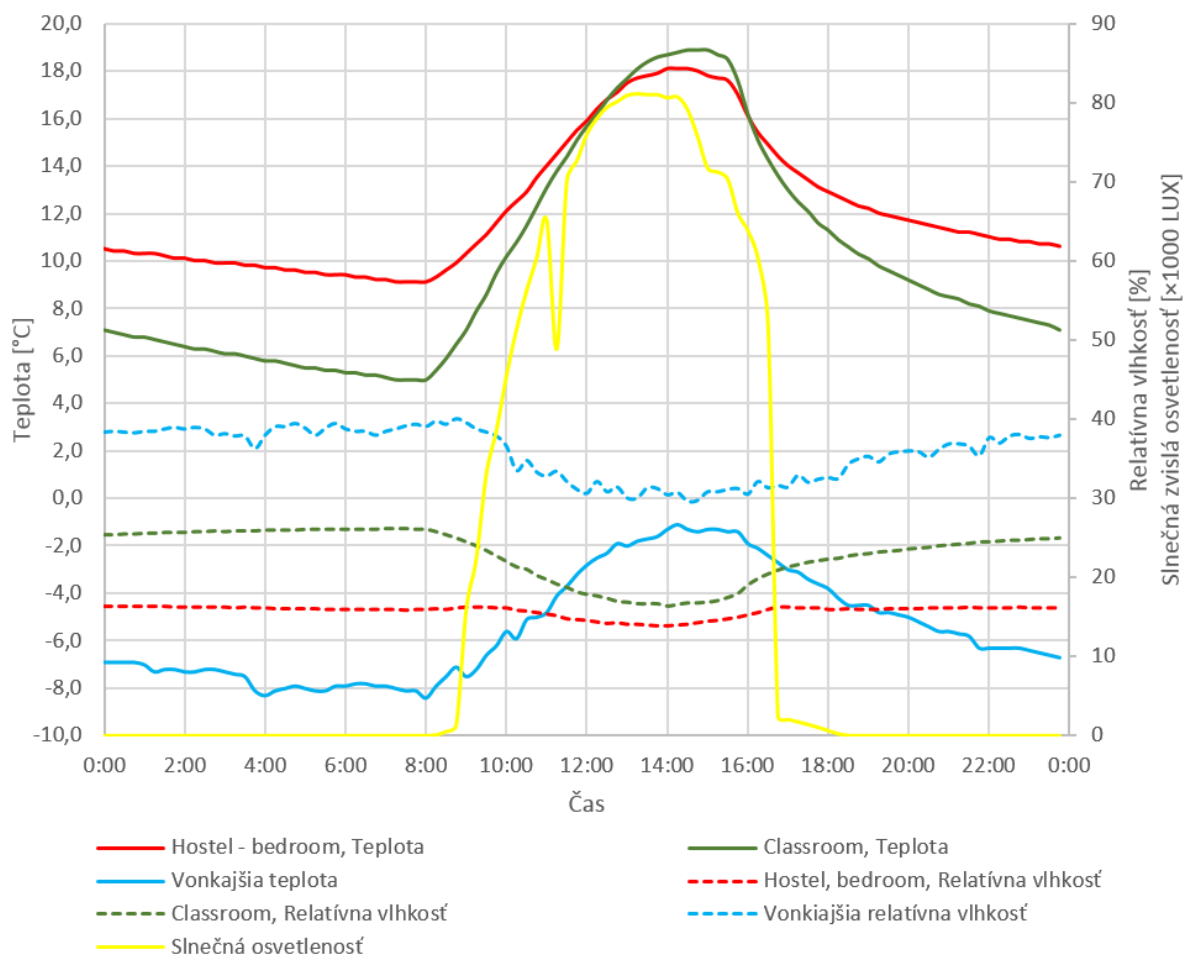


Obr. 3.11: Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Middle classroom, december – február



Obr. 3.12: Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Corner classroom, december – február

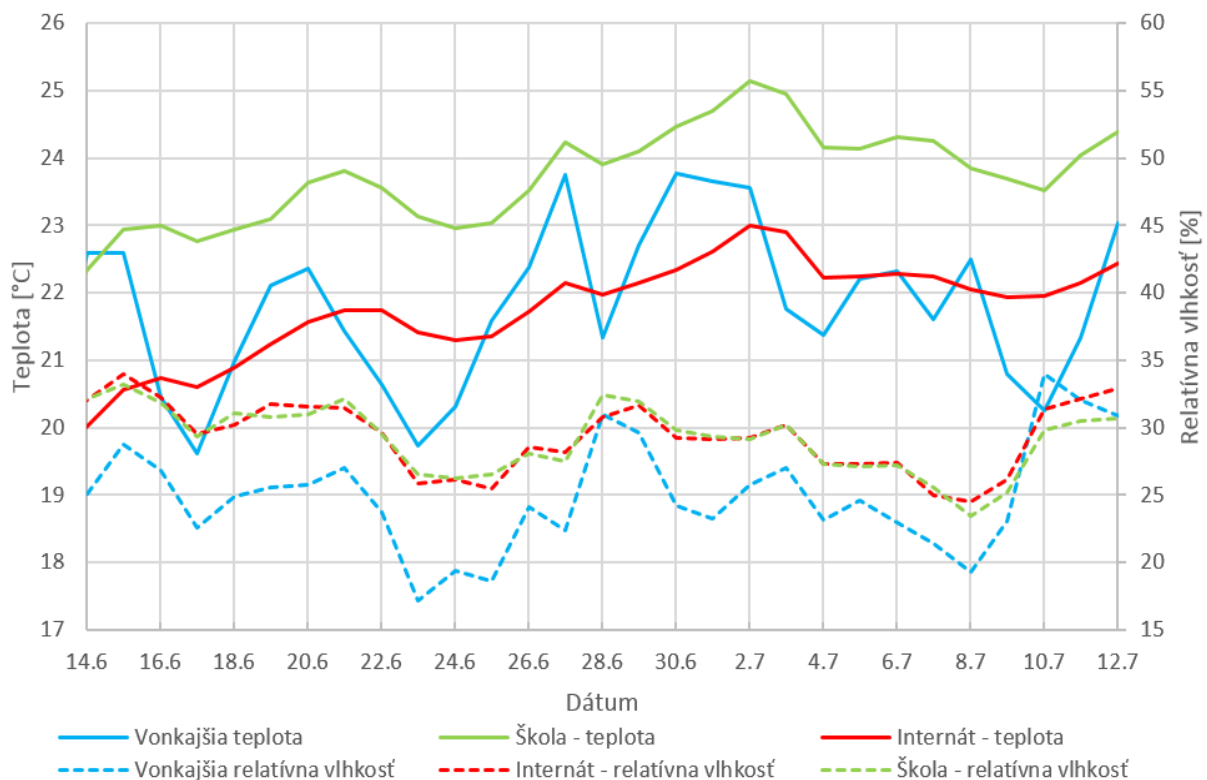
Pre názornosť je na obr. 3.13 zobrazený graf priebehu teplôt z 16.12.2016, kedy ešte fungoval luxmeter. Je zobrazená učebňa a miestnosť na ubytovanie v prvom poschodí. Meranie nie je ovplyvnené prítomnosťou osôb v miestnosti. Zvislá osvetlenosť je znázornená žltou čiarou a v poobedňajších hodinách dosahovala hodnotu 80 000 luxov. Doba slnečného svitu bola celkovo 10 hodín. Vidieť závislosť vnútornej teploty vzduchu na slnečnom žiarení, vďaka ktorému dosahujú teploty vzduchu interiéru prijateľných hodnôt aj napriek nízkej teplote vonkajšieho vzduchu. Relatívna vlhkosť vzduchu sa drží na stabilnej úrovni 15 % v internáte až 25 % v škole.



Obr. 3.13: Závislosť vnútorných teplôt vzduchu na slnečnom žiarení

3.2.2 Letné obdobie

V letnom období sa predpokladá nárast výsledných vnútorných teplôt vzduchu nad požadované medze. Za tie možno u školských zariadení považovať výslednú teplotu 28 °C a relatívnu vlhkosť 30 až 65 % (viď kap. 1.2.1). Údaje v tejto kapitole vychádzajú z najteplejšieho obdobia merania, a to od 14.6. do 12.7. Graf s priebehom teploty a relatívnej vlhkosti vonkajšieho vzduchu je zobrazený na obr. 3.4. V nasledujúcom grafe je priebeh priemerných teplôt vzduchu a relatívnych vlhkostí pre celý internát a školu. Dňa 2.7. bola nameraná najvyššia priemerná teplota vnútorného vzduchu jak v internáte, tak v škole. Je vidieť, že v škole dosahujú teploty vyšších hodnôt, čo spôsobuje veľká presklená plocha, chýbajúce slnolamy a nižšia akumulačná schopnosť budovy školy.

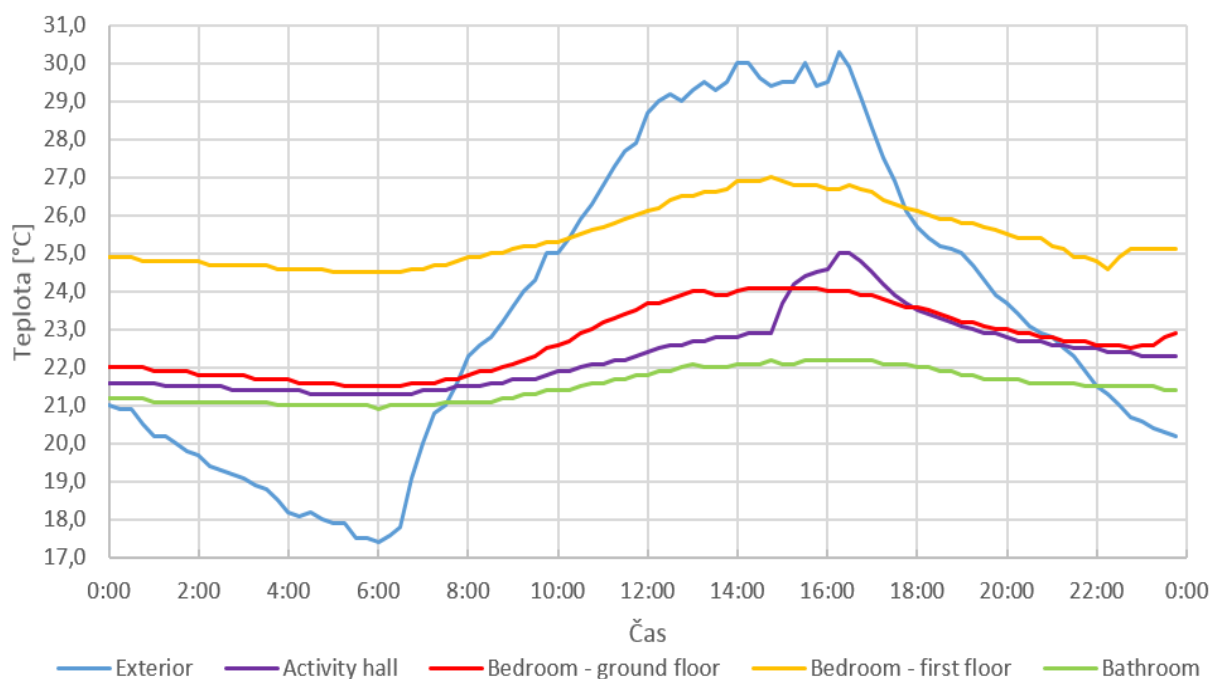


Obr. 3.14: Priebeh priemerných denných teplôt a relatívnych vlhkostí v letnom období

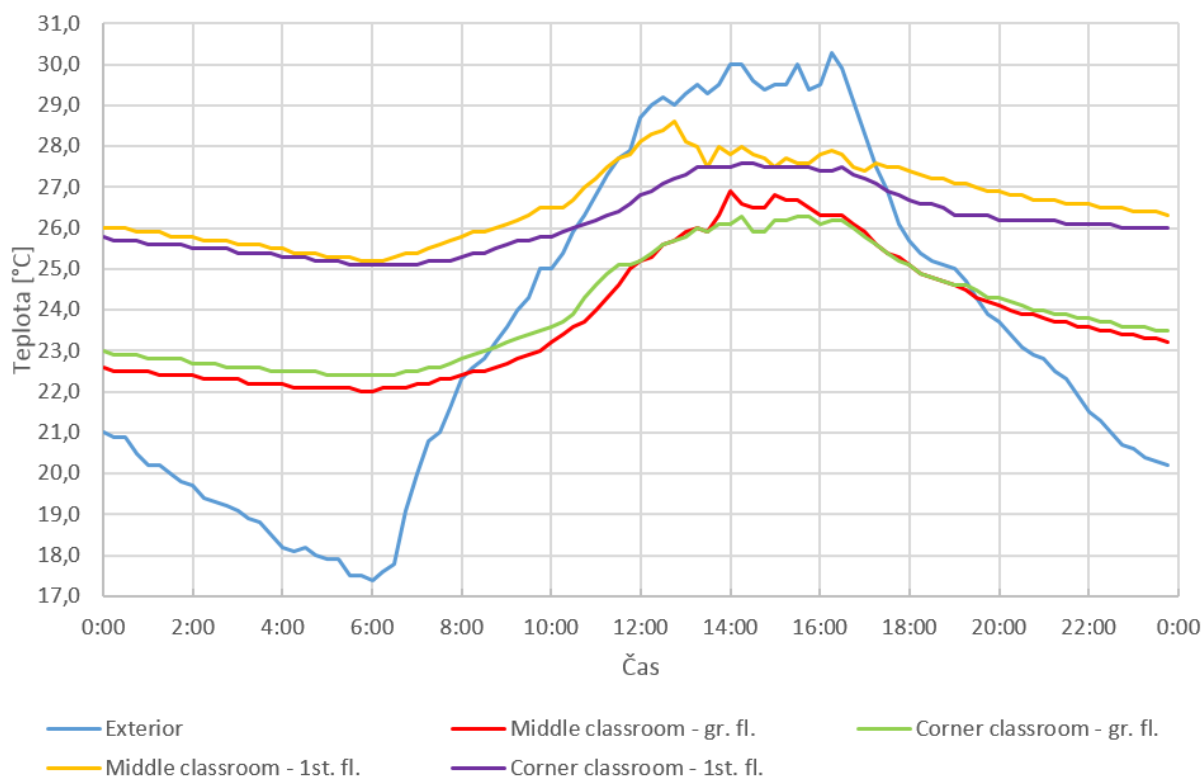
Grafy na obr. 3.15 a 3.16 znázorňujú priebeh teplôt vzduchu v jednotlivých miestnostiach internátu (obr. 3.15) a školy (obr. 3.16) v spomínaný deň s najvyššou priemernou teplotou vzduchu v interiéri. Obr. 3.17 znázorňuje priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí v niektorých miestnostiach a taktiež hodnoty namerané v exteriéri. Jedná sa o miestnosť na spanie v prvom poschodí, miestnosť „Activity Hall“ a učebňu v strede dispozície na prvom poschodí.

V letnom období sú miestnosti na prvom poschodí teplejšie ako v prízemí z dôvodu veľkých tepelných ziskov prestupom tepla cez obálku budovy. V budove internátu je dosiahnutá počas celého dňa dobrá tepelná stabilita a teplota vzduchu kolísala v rozmedzí ± 2 °C. Mierny nárast teploty vzduchu v miestnosti „Activity hall“ je spôsobený prítomnosťou osôb v poobedňajších hodinách (viď relatívna vlhkosť vzduchu v grafu na obr. 3.17). V najteplejšej miestnosti bola v poobedňajších hodinách prekročená maximálna prípustná hodnota podľa [5] 26 °C. Relatívna vlhkosť vzduchu sa pohybovala okolo 25 %, vzhľadom na nízku relatívnu vlhkosť exteriériu (viď obr. 3.17) nie je možné dosiahnuť vyššej relatívnej vlhkosti prirodzeným vetraním.

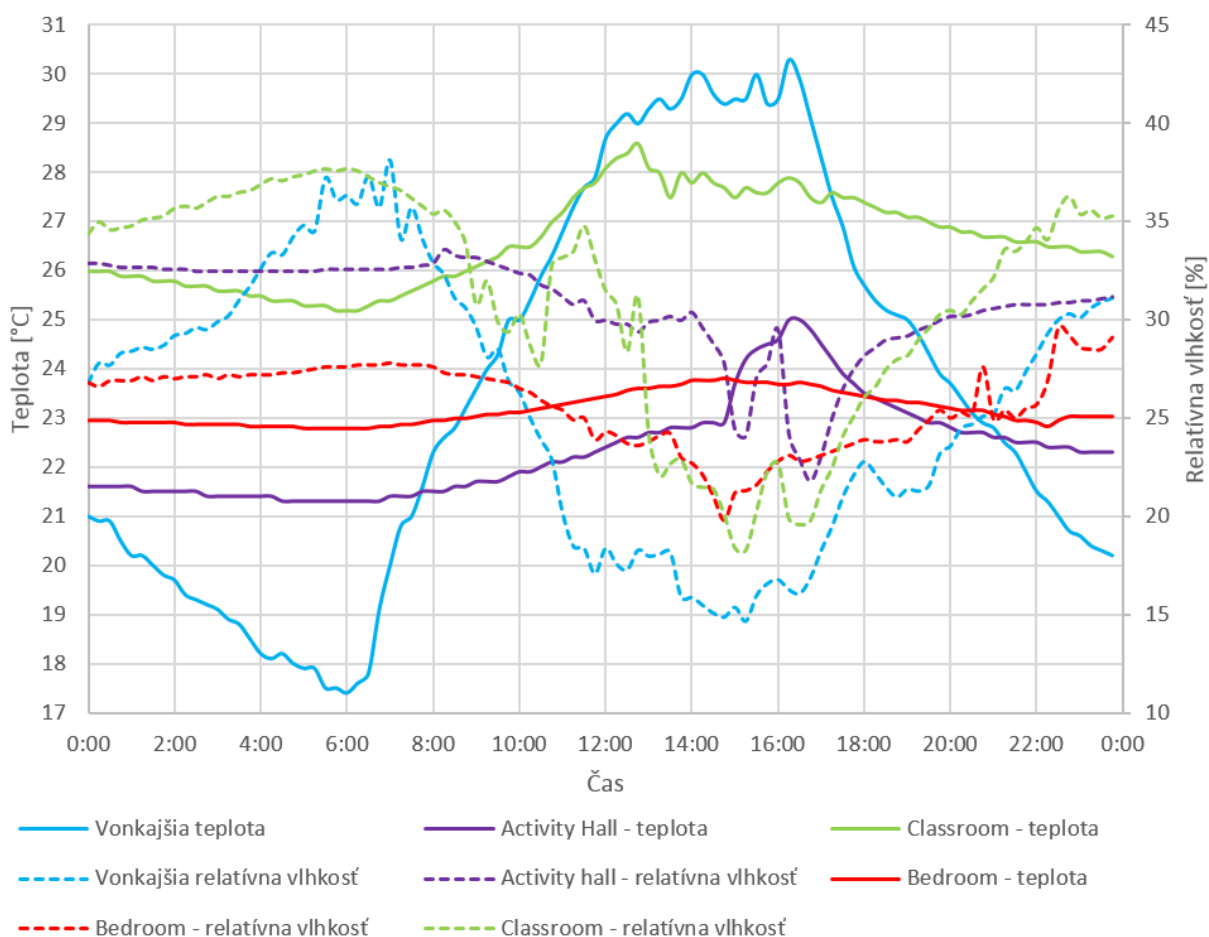
V budove školy dochádza k vyšším teplotným rozdielom v priebehu dňa. Vyšší nárast teplôt možno sledovať v učebniach s prebiehajúcou výukou, kde teplota v poobedňajších hodinách prekročila teplotu vzduchu maximálnu prípustnú hodnotu 28 °C. Vplyv vetrania a pohybu osôb na relatívnu vlhkosť a teplotu vzduchu vidieť aj z grafu na obr. 3.17. Relatívna vlhkosť v ranných hodinách sa pohybovala okolo 35 % a menila sa v závislosti na činnosti prítomných osôb a intenzite vetrania. Teplota vzduchu stúpala so stúpajúcou teplotou exteriériu a klesala pri intenzívnom vetraní a zatienení okien (zatiahnutie závesov). Tieto javy možno odvodiť zo zmeny relatívnej vlhkosti.



Obr. 3.15: Priebeh teplôt vzduchu v internáti, 2.7.2016



Obr. 3.16: Priebeh teplôt vzduchu v škole, 2.7.2016

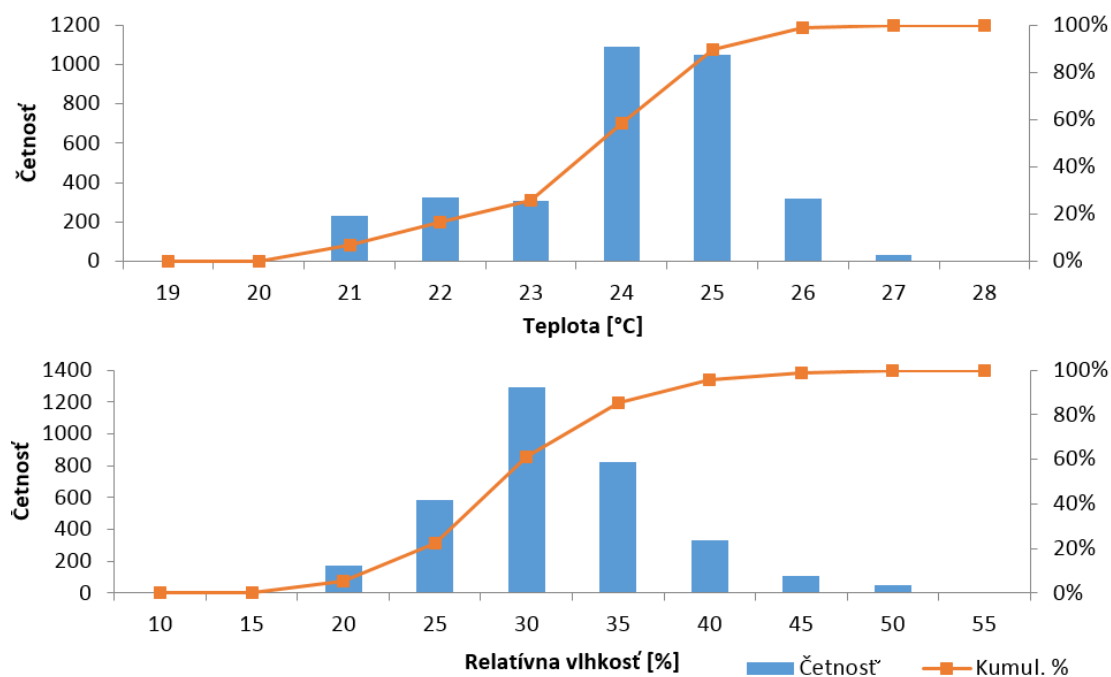


Obr. 3.17: Priebeh vnútornej a vonkajšej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, 2.7.2016

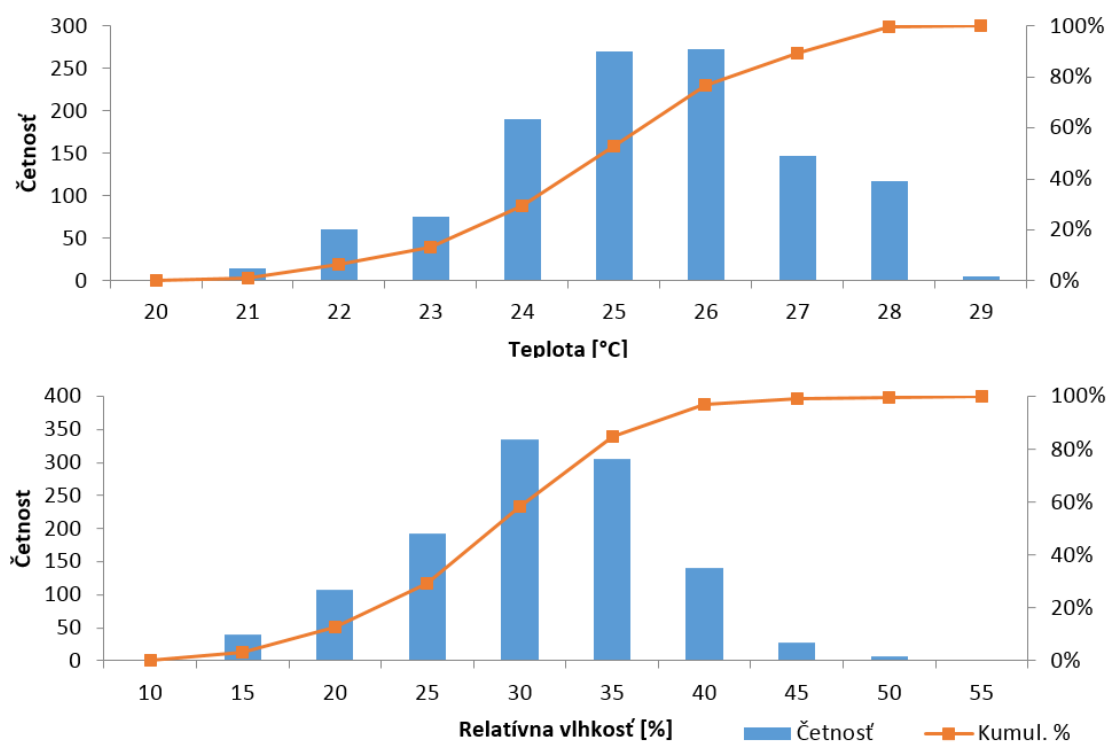
Nasledujúce obrázky ukazujú histogramy najteplejších miestností internátu a školy, ktoré vznikli na základe dostupných výsledkov meraní z obdobia 8.6. až 12.7. U školy bol opäť odfiltrovaný len vyučovací čas od 8:00 do 16:00, kedy dochádza k najvyšším nárastom teploty vzduchu, ako bolo ukázané na predchádzajúcich grafoch. Každý histogram pre internát je štatistikou z 3360 nameraných hodnôt, pre školu je to 1155 nameraných hodnôt.

V budove školy sa v sledovanom letnom období pohybovala výsledná teplota vzduchu v rozmedzí 20 až 27 °C a v 99 % prípadoch sa pohybovala pod hranicou prijateľných 26 °C. Relatívna vlhkosť sa najčastejšie pohybovala okolo 30 %. Vnútorne prostredie internátu teda dosahuje vcelku prijateľných hodnôt a vo väčšine prípadoch vyhovuje aj požiadavkám českej legislatívy. Vo zvyšných miestnostiach sa predpokladajú priaznivejšie hodnoty, vzhľadom k typickému priebehu teploty vzduchu na obr. 3.15.

V učebni sa počas letného obdobia teplota udržiavala v podobnom rozsahu ako v internáte s tým, že v histogramu je väčšie percentuálne zastúpenie vyšších hodnôt. Teplota vzduchu sa pohybovala v rozmedzí 20 až 29 °C a relatívna vlhkosť vzduchu dosahovala najčastejšie hodnoty 20 až 40 %. Prípustné maximum 28 °C bolo prekročené počas len počas necelého 1 % celého merania a to v čase, kedy vonkajšia teplota vzduchu prekročila 30 °C. Najčastejšie sa v učebni pohybovala teplota vzduchu okolo 25 °C. Tieto histogramy ukazujú, že aj napriek predpokladom nedochádza k príliš veľkému nárastu vnútornej teploty a vnútorné prostredie v škole taktiež vyhovuje vo väčšine prípadoch aj požiadavkám českej legislatívy.



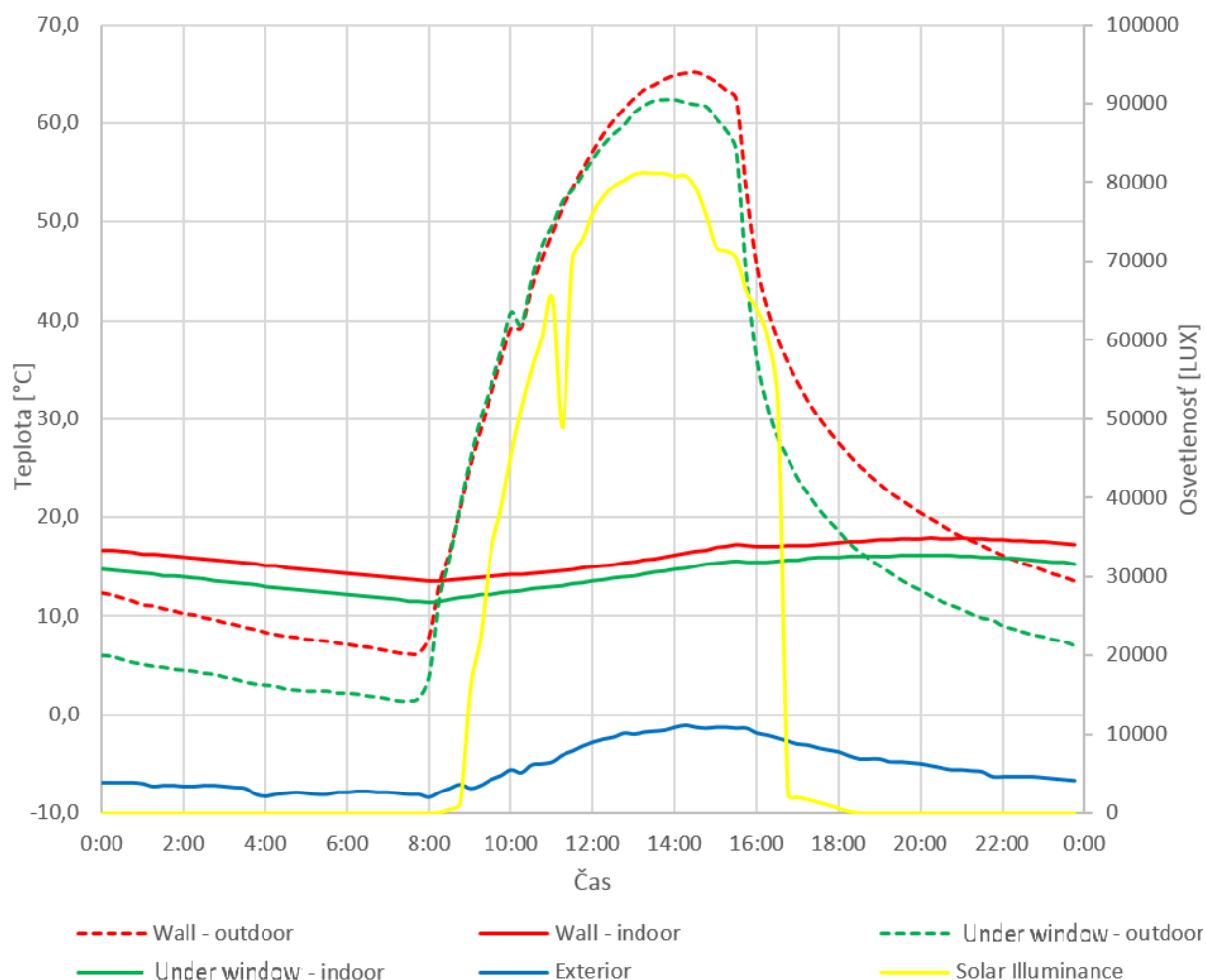
Obr. 3.18: Histogramy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, Bedroom – 1st floor, letné obdobie



Obr. 3.19: Histogramy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, Middle classroom – 1st floor, letné obdobie

3.3 Fázový posun v stene

Okrem teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu prebehlo aj meranie povrchových teplôt solárnej steny v budove školského internátu. Umiestnenie jednotlivých externých sond na konštrukcii je znázornené na obr. 2.7. Vplyvom zvyšujúcej sa slnečnej radiácie sa zvyšuje povrchová teplota na vonkajšom povrchu konštrukcie, tepelná energia sa akumuluje v konštrukcii a teplo prechádza ďalej smerom k vnútornému povrchu. Jeho teplota sa teda začne zvyšovať s určitým časovým oneskorením, pričom teplota vonkajšieho povrchu pozvoľna klesá. Tento čas, za ktorý prejde amplitúda tepelného kmitu z jednej strany konštrukcie do druhej, sa nazýva fázový posun teplotného kmitu. Je závislý na tepelnej kapacite materiálu, jeho hustote, tepelnej vodivosti a šírke samotnej konštrukcie. Obr. 3.20 znázorňuje výsledný graf priebehu povrchových teplôt a slnečnej osvetlenosti za slnečného dňa. Vidieť, že povrchové teploty na vonkajšom povrchu konštrukcie dosahujú okolo 14:00 maximálnych hodnôt nad 60 °C. Povrchové teploty na vnútornej strane dosahujú maximálnych hodnôt okolo 21:00, pričom teplota pod oknom je mierne nižšia. Teplota exteriéru sa pritom drží počas celého dňa pod bodom mrazu.

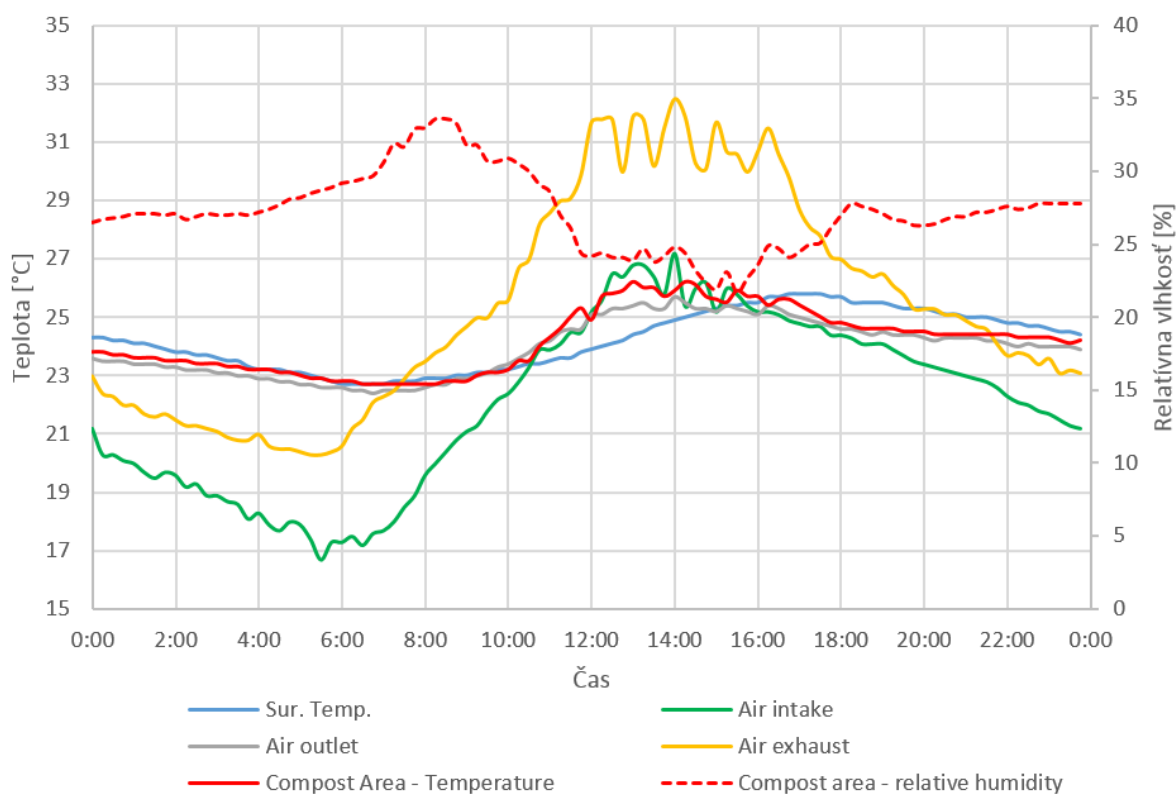


Obr. 3.20: Priebeh povrchových teplôt v solárnej stene

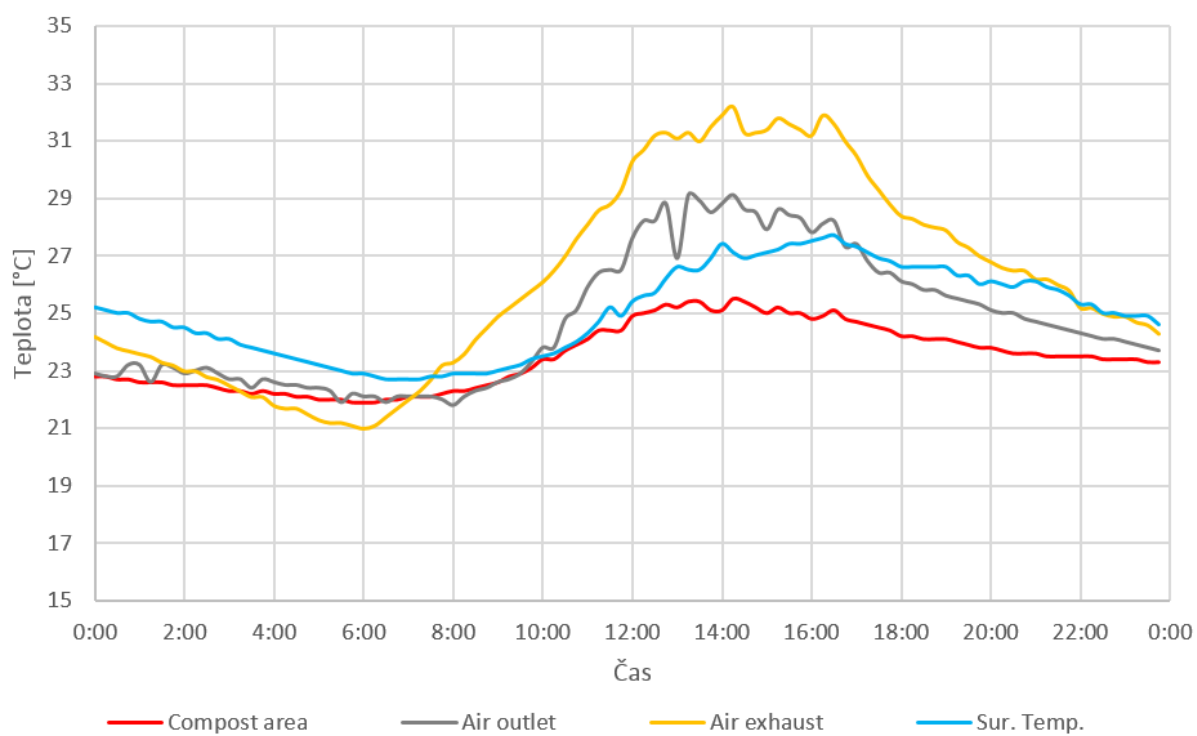
3.4 Priebeh teplôt v záchodoch

Nasledujúce grafy zobrazujú nameraný priebeh teplôt v jednotlivých bodoch záchodov. Na obr. 3.21 je tzv. „European toilet“, čiže záchod s vylepšenou tvorbou kompostu, obr. 3.22 znázorňuje priebeh teplôt v tradičnom záchode. Jednotlivé merané body sú popísané v obr. 2.9 a 2.10. Vo vylepšenom záchode je meraná aj relatívna vlhkosť priestoru s kompostom. V prvom prípade tvorí transparentný povrch solárnej steny plech, v druhom prípade ho tvorí sklo. Podľa priebehu vnútorných povrchových teplôt vidíme, že v prípade skla je solárna energia využívaná efektívnejšie a teploty sú v tomto prípade vyššie. Taktiež vidíme lepší vztlak v tomto prípade, nakoľko teplota odvádzaného vzduchu v oboch miestach komína je mierne vyššia. Zo subjektívnych výpovedí miestnych však vyplýva, že záchody nefungujú úplne podľa predstáv a znehodnotený vzduch z priestoru s kompostom prúdi skôr do miestnosti ako do komína. Tento fakt by bolo vhodné overiť skúškou in situ napr. pomocou dymu. Je pravdepodobné, že potrebný vztlak nie je dosiahnutý vplyvom malých odvodných otvorov v komíne (viď fotografia na obr. 3.23). Do komína je tak zbytočne vnesená veľká tlaková strata a vzduch je nútený prúdiť skôr otvorom priamo do miestnosti. Možným riešením v prípade „European toilets“ je zakrývanie tohto otvoru v čase mimo používania toalety, čím by bol vzduch nútený prúdiť práve solárnym komínom. Prívod vzduchu v tomto prípade je riešený v spodnej časti priestoru s kompostom.

Modelovanie prirodzeného prúdenia vzduchu v záchode už presahuje rozsah tejto práce a priebeh teplôt môže byť dobrým podkladom pre každého, kto by sa o túto problematiku zaujímal. Všetky namerané dáta, rovnako ako elektronická verzia tohto dokumentu, sú neoddeliteľnou súčasťou tejto práce a sú na priloženom CD, v elektronickej verzii práce sú namerané dáta v prílohách práce a sú voľne dostupné.



Obr. 3.21: Priebeh teplôt a relatívnej vlhkosti v záchode „European toilet“



Obr. 3.22: Priebeh teplôt v záchode „Traditional toilet“



Obr. 3.23: Malá prierezová plocha otvoru na odvod odpadného vzduchu

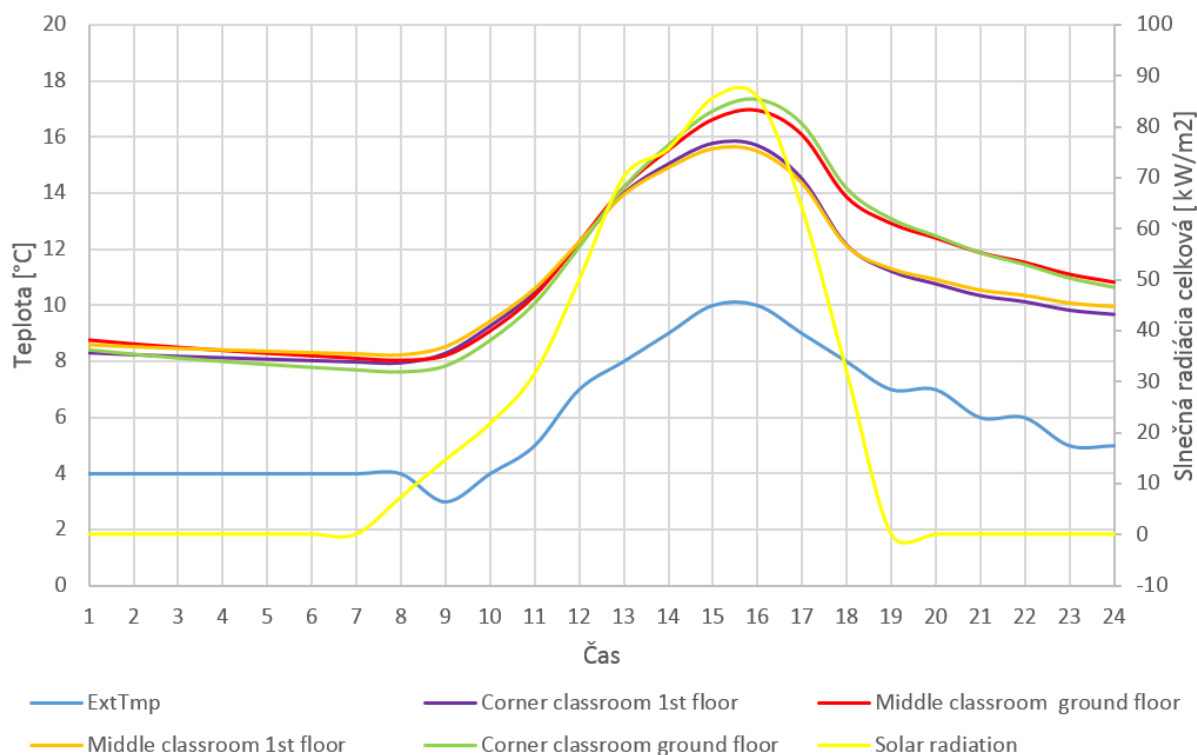
4 Hodnotenie na základe modelovania v programe Bsim

V tejto kapitole som sú ukázané simulácie rôznych variant za účelom zlepšenia súčasného stavu objektov. Najskôr bude uvedená simulácia súčasného stavu bez obsadenosti osobami, aby čo najvernejšie odpovedala skutočnému stavu počas merania. Výsledky budú porovnané s nameranými hodnotami. Následne budú riešené rôzne varianty a budú sledované zmeny stavu vnútorného prostredia.

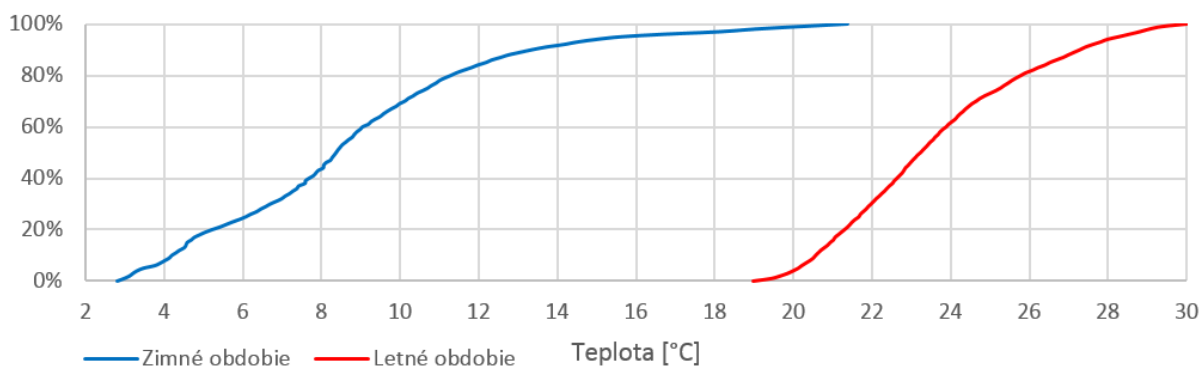
4.1 Budova školy

4.1.1 Súčasný stav

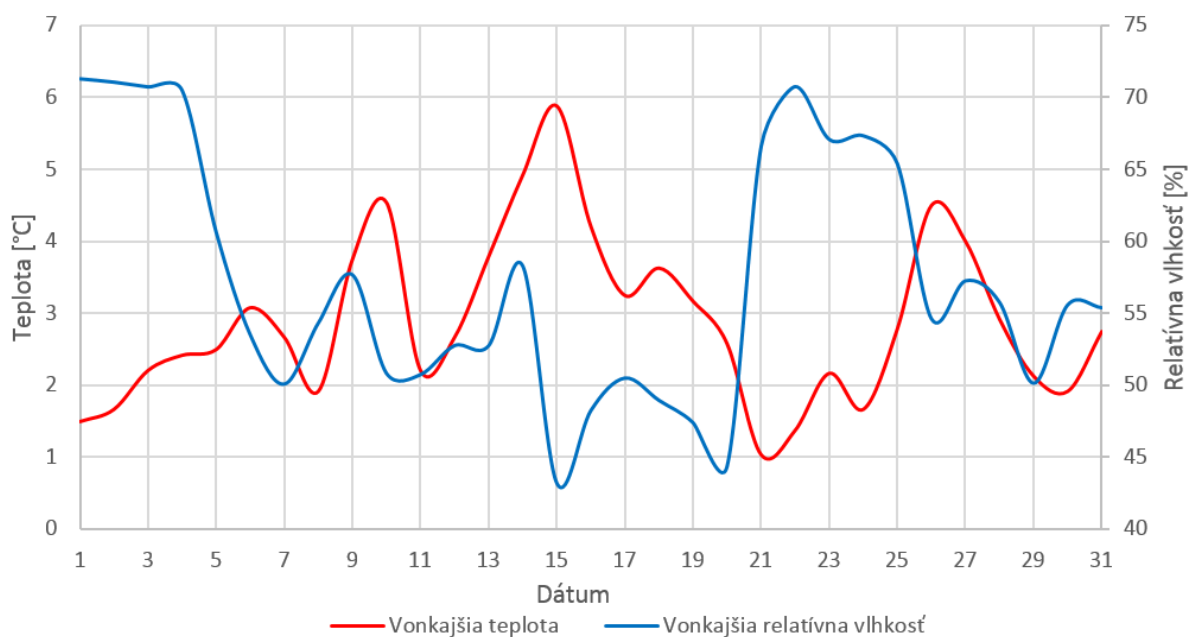
Pre názornosť bol simulovaný súčasný stav objektu, kde ako jediný systém bola nastavená infiltrácia. Na nasledujúcom obrázku je priebeh výsledných teplôt v chladnom dni. Je vidieť podobný priebeh teplôt v jednotlivých zónach ako v grafu na obr. 3.7. Ďalší graf znázorňuje, v koľkých percentách prípadov je teplota vzduchu nižšia než teplota uvedená na ose X. Napr. v 70 % prípadoch bola teplota v zimnom období nižšia ako 10 °C. Porovnaním s histogrammi na obr. 3.11 a 3.12 zisťujeme, že výsledky zo simulácie pre zimné obdobie sú menej priaznivé ako namerané hodnoty. Jedná sa však o priemer pre celú budovu školy. V letnom období sa teplota pohybuje v rozmedzí 19 až 30 °C, čo odpovedá nameraným hodnotám. Maximálna prípustná teplota vnútorného vzduchu 28 °C je prekročená u 7 % prípadov. Rozdiely sú spôsobené hlavne odlišnými okrajovými podmienkami, ako bolo spomenuté na začiatku tejto práce. Podmienky vonkajšieho prostredia znázorňuje graf na obr. 4.3. Jeho porovnaním s nameranými hodnotami (obr. 3.3) zisťujeme, že namerané teploty boli v zime priemerne o 5 °C nižšie, v oblasti Srinagaru sa však relatívna vlhkosť pohybuje priemerne o 20 % vyššie, čo má nepriaznivý vplyv na vnútorné prostredie hlavne v zimnom období.



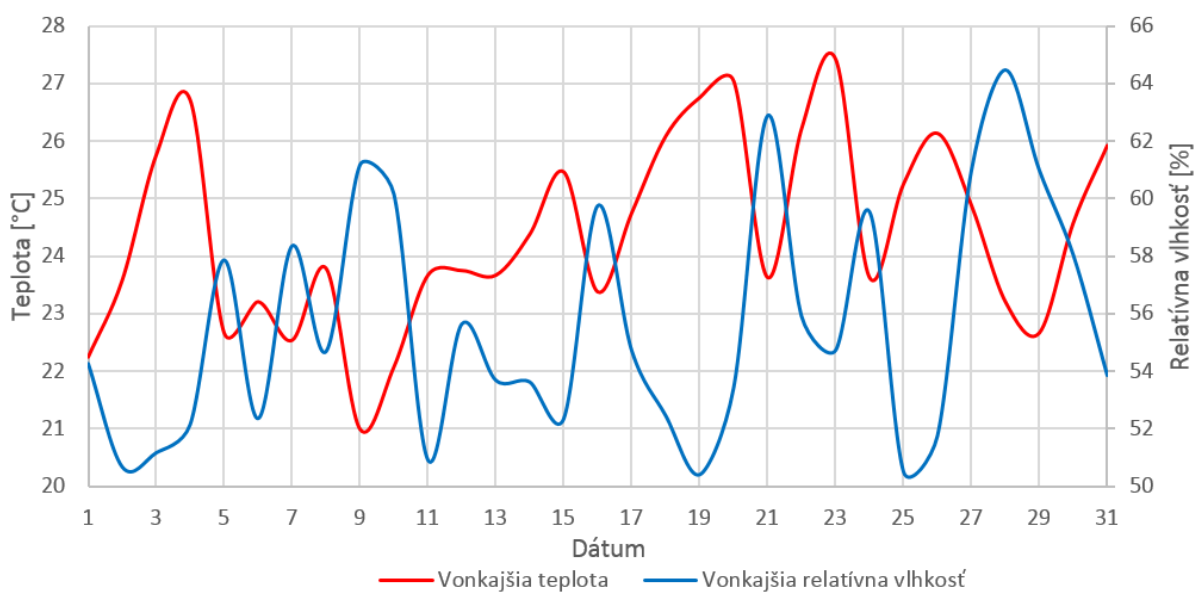
Obr. 4.1: Priebeh teplôt vzduchu v škole v chladnom dni



Obr. 4.2: Percentuálne zastúpenie teplôt vnútorného vzduchu školy

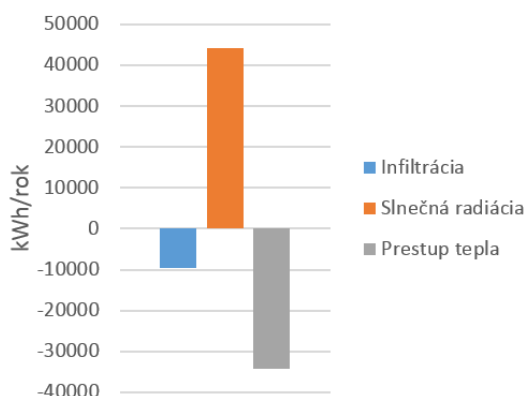


Obr. 4.3: Simulácia priebehu vonkajšej teploty a relatívnej vlhkosti, január



Obr. 4.4: Simulácia priebehu vonkajšej teploty a relatívnej vlhkosti, júl

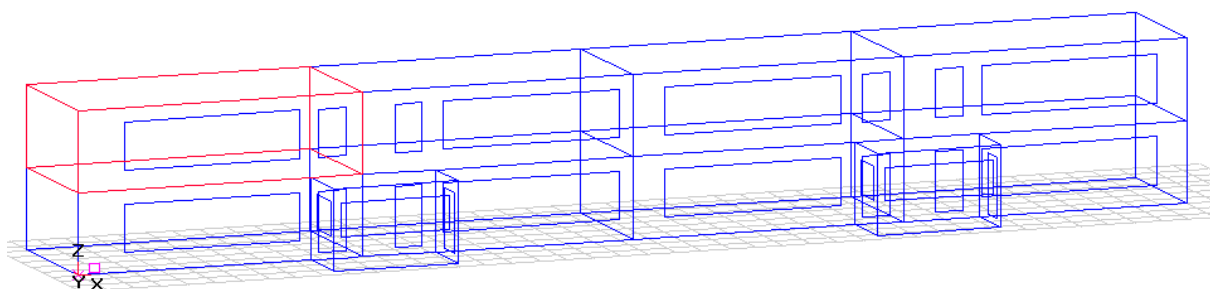
Nasledujúci graf znázorňuje celkovú energetickú bilanciu za sledovaný rok 2016. Celkový ročný únik tepla činí cca 43 MWh za rok, z toho 34 MWh je únik tepla prestupom a zvyšok je únik infiltráciou vzduchu cez netesnosti obálky budovy. Táto energia musí byť pokrytá ročným tepelným ziskom slnečnou radiáciou.



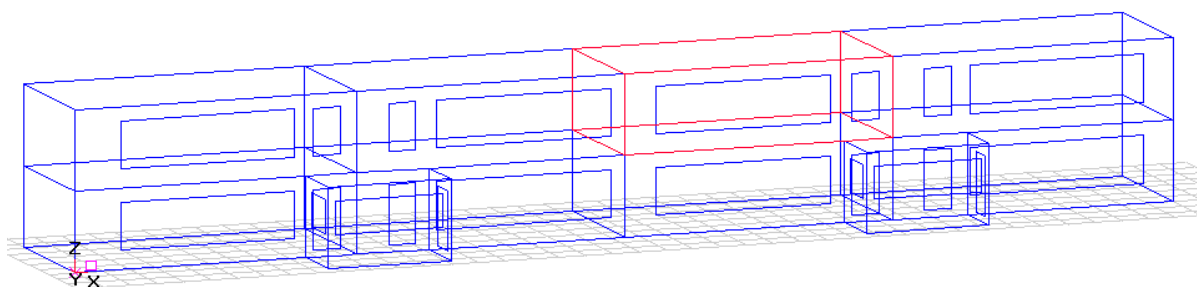
Obr. 4.5: Energetická bilancia školy, súčasný stav

V ďalšom textu budú zobrazené grafy pre najchladnejšiu (rohová učebňa na poschodí) a najteplejšiu (učebňa na prízemí v strede dispozície) miestnosť a budú sledované zmeny parametrov vnútorného vzduchu pri rôznych úpravách systémov zadanych v daných zónach. Zmeny v zimnom období budú sledované v rohovej učebni (viď obr. 4.6) a v letnom období bude sledovaná učebňa v strede dispozície (viď obr. 4.7). Priebeh

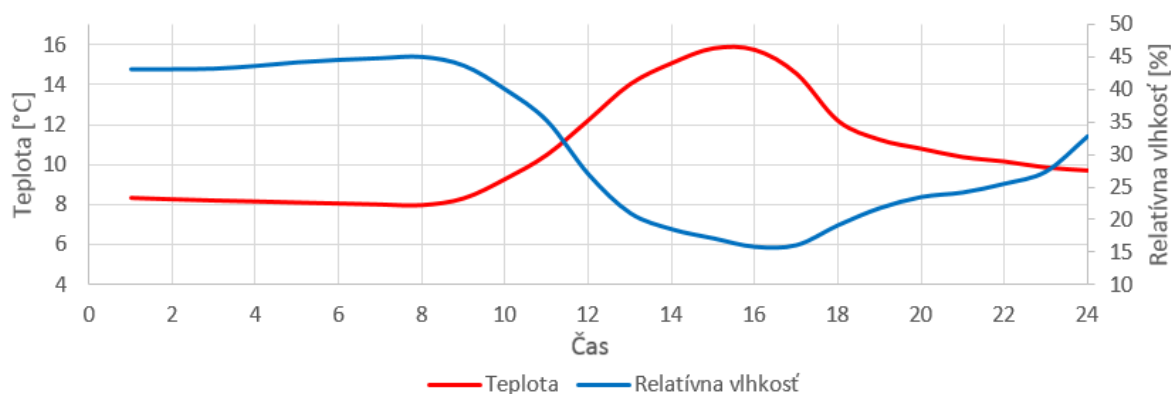
teploty v najchladnejšom dni zobrazuje graf na obr. 4.8. Počas dňa teplota vystúpila až na hodnotu 16 °C, pričom jediným zdrojom tepla je slnečná radiácia. Zároveň možno sledovať veľký pokles relatívnej vlhkosti vzduchu. V letnom období (obr. 4.9) dosahuje výsledná vnútorná teplota vzduchu hodnôt vyše 29 °C, čo korešponduje s nameranými hodnotami v grafe na obr. 3.16.



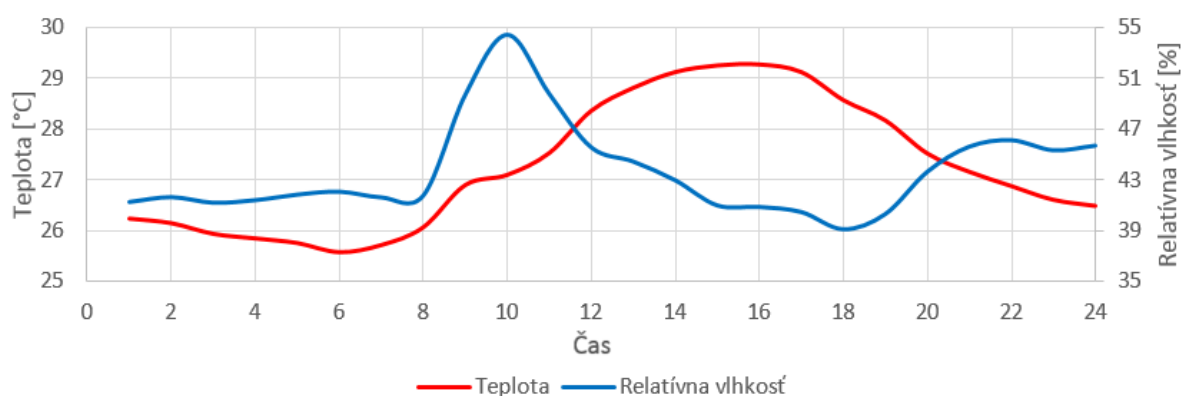
Obr. 4.6: Učebňa posudzovaná v zimnom období (Corner classroom, 1st floor)



Obr. 4.7: Učebňa posudzovaná v letnom období (Middle classroom, 1st floor)



Obr. 4.8: Priebek vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti, zimné obdobie

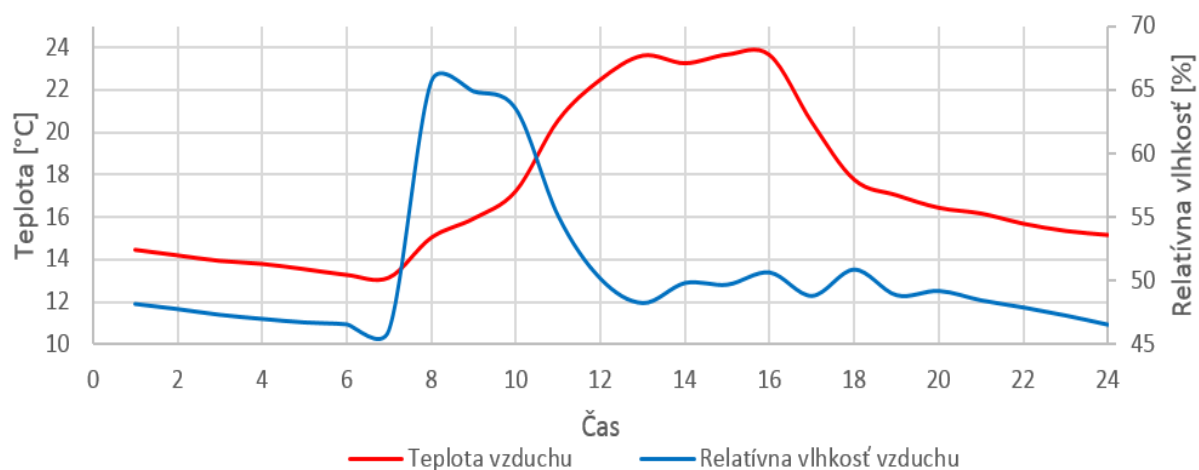


Obr. 4.9: Priebek vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti, letné obdobie

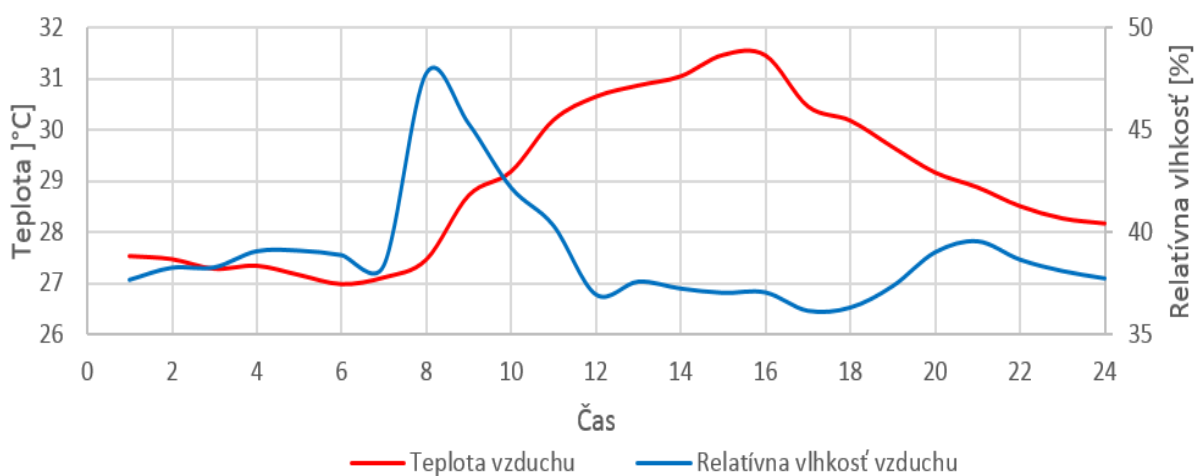
4.1.2 Obsadenosť osobami

Simulovaná je plná obsadenosť v čase výuky, teda v každej učebni 33 osôb od 8:00 do 16:00. Predpokladá sa, že okna budú otvárané pri prekročení teploty 24 °C alebo koncentrácie CO₂ 3000 ppm. Z grafu na obr. 4.10 vidieť, že teploty v zimnom období dosahujú omnoho prijateľnejších hodnôt a po väčšinu vyučovacej doby v sledovanom dni neklesla teplota vzduchu pod 16 °C. Relatívna vlhkosť vzduchu je podstatne vyššia ako v prípade prázdnej učebne. Pokles relatívnej vlhkosti je spôsobený vyvetraním v čase prekročenia limitu CO₂. V letnom období (obr. 4.11) vidieť nárast teploty až nad 30 °C, čomu sa nezabráni ani vetraním miestnosti. Teplota vzduchu nikdy neklesla pod 10 °C a v 60 % prípadoch dosiahla hodnoty 13 °C. V letnom období sa však držala neustále nad hranicou 28 °C. Z uvedeného vyplýva, že obsadenosť osôb má priaznivý vplyv na vnútorné prostredie v zimnom období, v lete však dochádza k nadbytočnému otepľovaniu miestnosti nad prípustné hodnoty a prostredie sa tak stáva nevyhovujúcim.

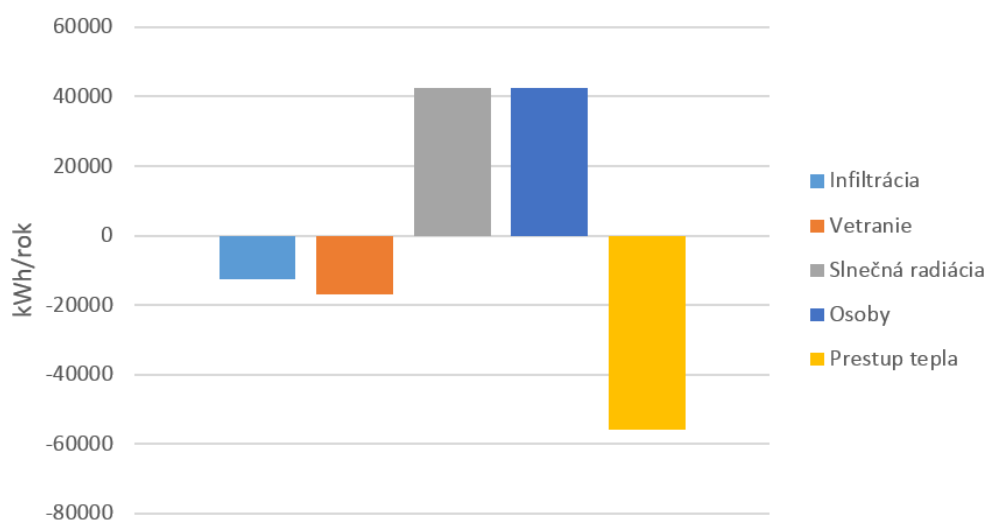
Energetická bilancia za celý rok pri uvažovaní vplyvu osôb a prirodzeného vetrania je na obr. 4.12. V dôsledku vyšších teplôt sú vyššie aj tepelné straty prestupom tepla. Celkový ročný tepelný únik bude 85 MWh. Z toho je 55 MWh ročný únik tepla prestupom, 13 MWh únik infiltráciou vzduchu a 17 MWh je energia uniknutá vetraním. Na tepelných ziskoch sa podieľajú takmer rovnako osoby aj slnečná radiácia (43 MWh).



Obr. 4.10: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti v zimnom období pri uvažovaní vplyvu osôb



Obr. 4.11: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti v letnom období pri uvažovaní vplyvu osôb

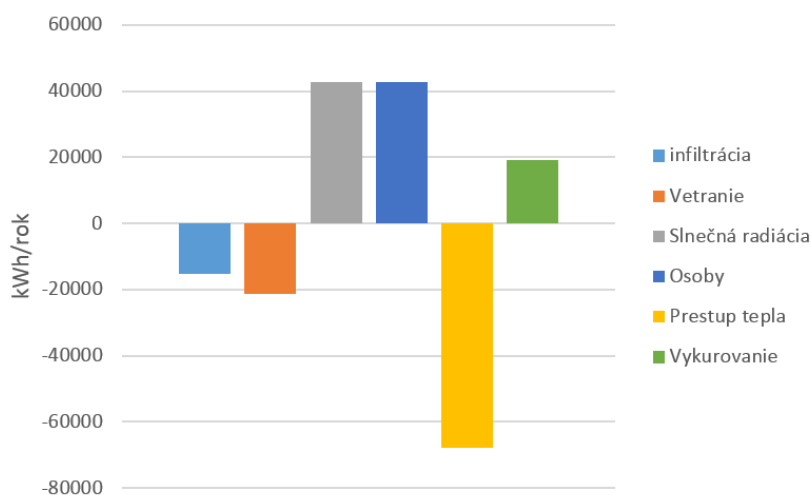


Obr. 4.12: Energetická bilancia pri uvažovaní vplyvu osôb

4.1.3 Výpočet potrebného výkonu zdroja tepla

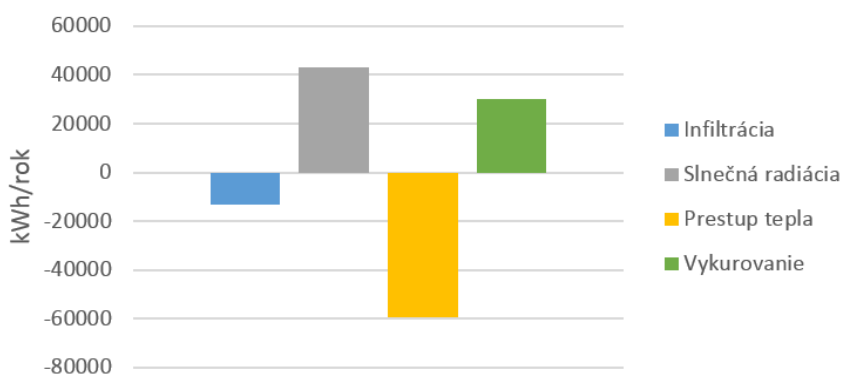
Ak chceme udržať teplotu vnútorného vzduchu na určitej požadovanej hranici, musíme navrhnuť alternatívny zdroj tepla, ktorý by nahradil slnečnú radiáciu v dobe slabého slnečného svitu. Na základe obr. 1.10 som zvolil požadovanú teplotu 19,5 °C. Pre názornosť je zobrazená energetická bilancia pre prípad s osobami a bez osôb. Pri plnom obsadení osobami potrebuje každá zóna na udržanie požadovanej minimálnej teploty výkon cca 2 kW. Pre celú budovu by bol potrebný zdroj tepla o výkone minimálne 17,3 kW. Vstupné predsienie a schodisko boli uvažované ako nevykurovaný priestor.

Energetická bilancia v tomto prípade je na obr. 4.13. Celková ročná potreba tepla je 104,2 MWh. Na pokrytí tejto energie sa podieľajú osoby a slnečná radiácia rovnakým ročným výdajom 43 MWh. Zvyšných 18 MWh pokryje navrhnutý zdroj tepla s výkonom 17,3 kW.



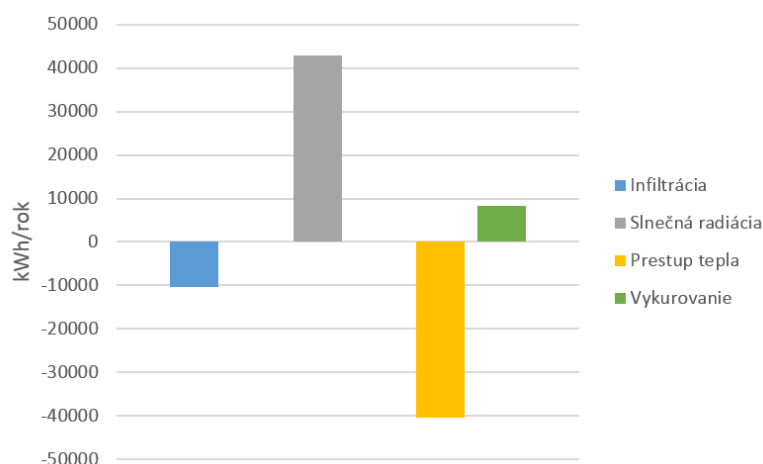
Obr. 4.13: Energetická bilancia pri uvažovaní ďalšieho zdroja tepla a vplyvu osôb

V prípade, že neuvažujeme vplyv osôb a vetrania, musí celú ročnú potrebu tepla pokryť slnečná radiácia v kombinácii s navrhnutým zdrojom tepla. Výkon je opäť 17,3 kW, avšak ročný výdaj tepla od zdroja je 30,3 MWh. Celková ročná potreba tepla je 73 MWh, zvyšné straty pokryje slnečná radiácia. Energetická bilancia je pre tento prípad zobrazená na obr. 4.14.

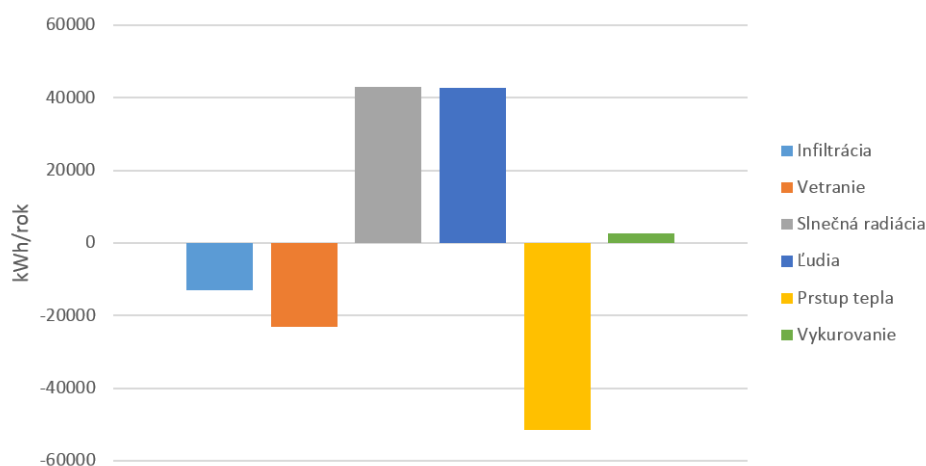


Obr. 4.14: Energetická bilancia pri uvažovaní ďalšieho zdroja tepla bez vplyvu osôb

V predchádzajúcich variantoch sa uvažovalo s konštantnou teplotou počas celého dňa zvolenú na základe AMV indexu rovného nule. Vypočítaná potreba tepla je však príliš vysoká a škola by na trvale udržanie takéhoto zdroja tepla nemala finančné prostriedky. Pri uvažovaní $PPD = 20 \%$, čomu odpovedá teplota vzduchu $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, bude stačiť podstatne nižší výkon a ročná potreba tepla bude taktiež omnoho nižšia, ako ukazuje obr. 4.15. Potrebný výkon zdroja je v tomto prípade $9,2\text{ kW}$ a jeho ročný celkový výdaj tepla je $8,3\text{ MWh}$. To je o 73% menej, ako v predchádzajúcom prípade. Aktuálne sa cena elektriny v Indii pohybuje v rozmedzí 3 až 5 INR za jednu kWh. Náklady na prevádzku takéhoto zdroja tepla by teda v prípade odberu priamo z distribučnej siete boli cca $42\,000\text{ INR}$, čo je v prepočte necelých $12\,000\text{ Kč}$. Do výpočtu však neboli zahrnuté tepelné zisky osôb a straty vetraním. Výsledky simulácie s uvažovaním vplyvu osôb sú na obr. 4.16. V tomto prípade je ročná potreba tepla od dodatočného zdroja len celé 3 MWh , čo je o 83% menej ako v prípade uvedenom na obr. 4.13.



Obr. 4.15: Energetická bilancia pri uvažovaní teploty $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez vplyvu osôb

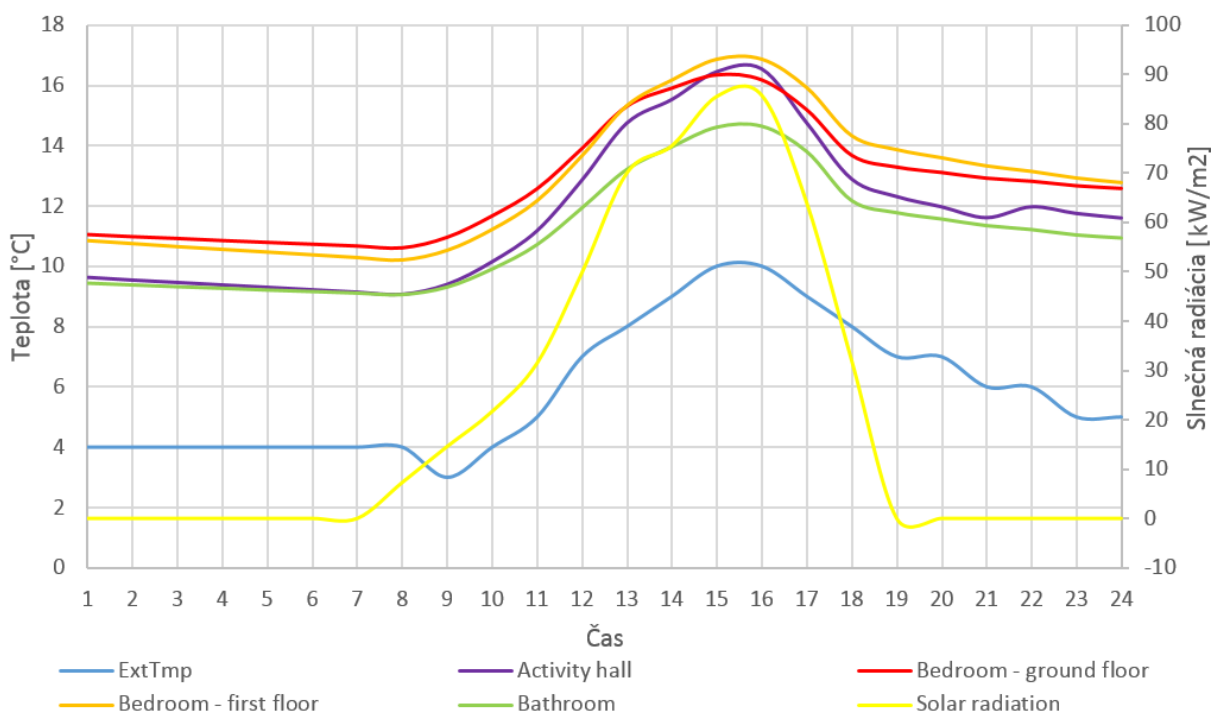


Obr. 4.16: Energetická bilancia pri uvažovaní teploty $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vplyvu osôb

4.2 Budova školského internátu

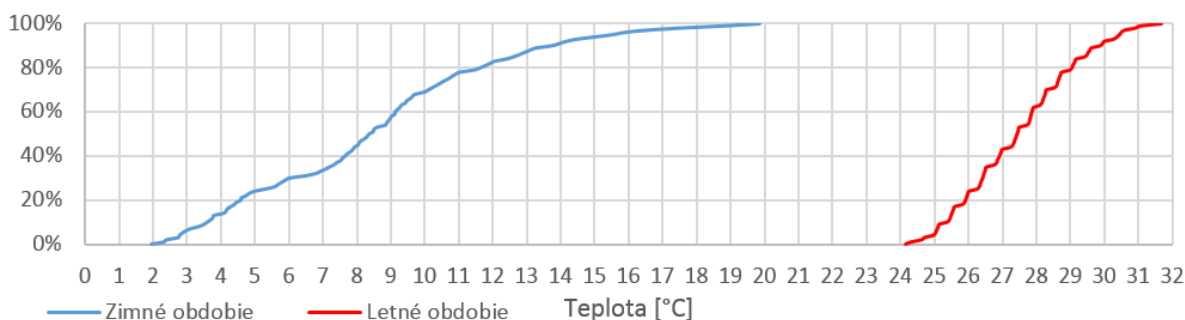
4.2.1 Súčasný stav

Opäť je na začiatku sledovaný súčasný stav bez obsadenosti ľudmi. Vonkajšie podmienky sú rovnaké ako v kap. 4.1. a nasledujúci graf možno porovnať s grafom na obr. 3.6. Vidieť obdobný priebeh teplôt ako v prípade skutočného merania, avšak s vyššími hodnotami, ktoré sú spôsobené vyššími teplotami okolia. Obe kúpeľne tvoria v modeli jednu zónu, preto je ich teplota priemerne vyššia ako v prípade výsledkov z meraní. Taktiež vidieť, že v priebehu dňa sa oproti iným miestnostiam nadmerne zvyšuje teplota miestnosti „Activity hall“, a to v dôsledku väčšej presklenej plochy. Vo večerných hodinách naopak teplota prudko klesá. Medzi deviatou a desiatou večernou hodinou možno sledovať mierny nárast teploty. Graf na obr. 3.20 ukazuje, že práve v tomto čase je vnútorná povrchová teplota solárnej steny najvyššia. Tento nárast teploty vzduchu je teda spôsobený práve teplom predávaným do vzduchu z povrchov stien. Porovnaním s výsledkami zo školy na obr. 4.1 vidíme, že maximálne teploty dosahujú nižších hodnôt, avšak minimálne teploty v noci sú vyššie. Môžeme teda sledovať menší teplotný rozptyl, budova internátu má teda lepšiu tepelnú stabilitu vplyvom akumulčných schopností obvodových konštrukcií. Táto skutočnosť korešponduje s výsledkami z meraní.



Obr. 4.17: Priebeh teplôt v internáte v chladnom dni

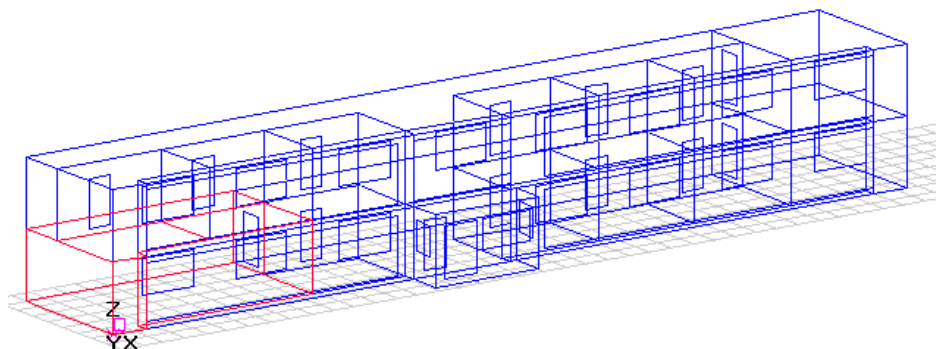
Krivky percentuálneho zastúpenia jednotlivých vnútorných teplôt v priebehu zimy a leta v internáte sú na nasledujúcom obrázku. Pre zimné obdobie odpovedajú krivky nameraným hodnotám, v letnom období vidíme vyššie teploty ako v prípade nameraných hodnôt. Je to pravdepodobne spôsobené vyššími priemernými teplotami v oblasti Srinagaru. Najväčšie zastúpenie majú v zimnom období teploty od 7 do 12 °C, v letnom období sa teploty pohybujú od 24 do 31 °C. Jedná sa však opäť o priemerné hodnoty pre celú budovu, avšak z grafu na obr. 4.17 sú vidieť rozdiely medzi jednotlivými miestnosťami. Pri výpočtoch boli uvažované straty prestupom tepla a infiltráciou a tepelné zisky slnečnou radiáciou.



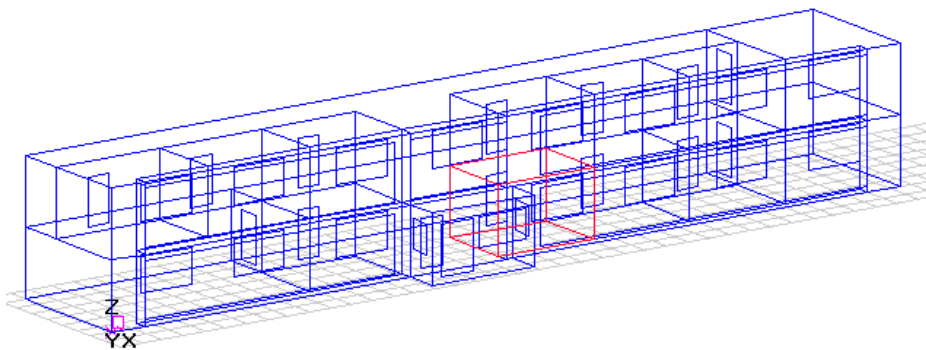
Obr. 4.18: Percentuálne zastúpenie teplôt vnútorného vzduchu internátu v zimnom a letnom období

V zime je najteplejšou miestnosťou miestnosť na spanie na prízemí („Bedroom – ground floor“) a najchladnejšou miestnosťou je spoločenská miestnosť („Activity Hall“). Activity hall však nie je typickou miestnosťou, preto bude v zimnom období posudzovaná miestnosť na spanie v prvom podlaží. Grafy v nasledujúcich obrázkoch budú zobrazovať hodnoty v týchto miestnostiach, nakoľko v ostatných zónach sú hodnoty priaznivejšie. Posudzované miestnosti sú na obr. 4.19 až 4.21.

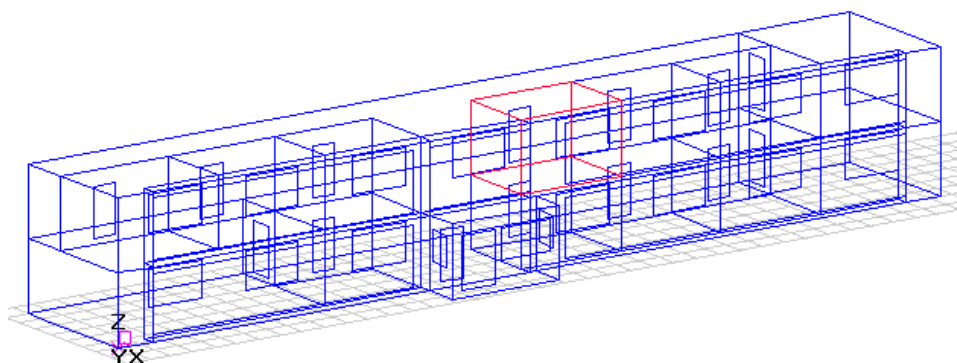
Na obr. 4.22 je energetická bilancia pre budovu internátu za celý rok. Jediný uvažovaný systém je infiltrácia. Vidieť, že tepelné straty sú v porovnaní s budovou školy polovičné. Celková ročná potreba tepla je 16 MWh, z toho 8,2 MWh na pokrytie strát infiltráciou vzduchu. Táto energia je získaná slnečnou radiáciou. Celkový ročný únik energie z priestoru solárnej steny je 59,5 MWh. Najväčší vplyv na tepelné straty prestupom tepla má hlavne presklená plocha, ktorá je omnoho menšia ako v prípade školy, preto sú straty prestupom omnoho menšie. V ďalších kapitolách bude opäť simulovaná situácia s ľuďmi a vhodným zdrojom tepla.



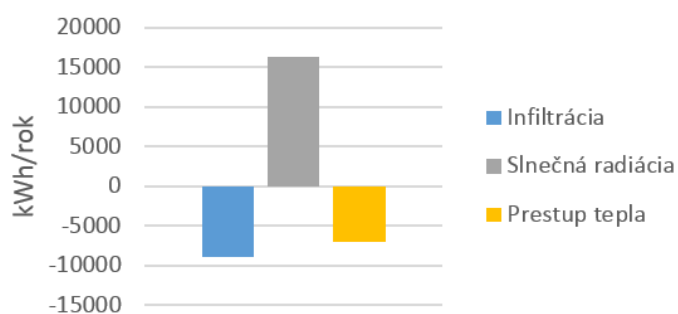
Obr. 4.19: Miestnosť „Activity Hall“



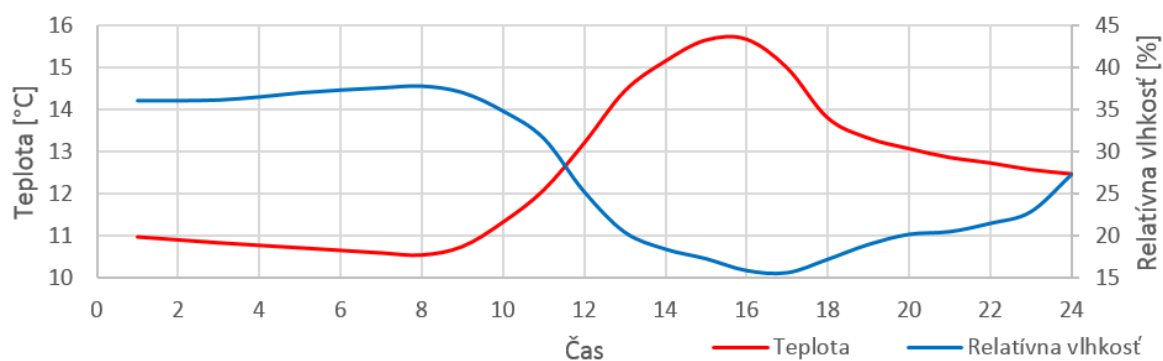
Obr. 4.20: Miestnosť posudzovaná v letnom období (Bedroom, ground floor)



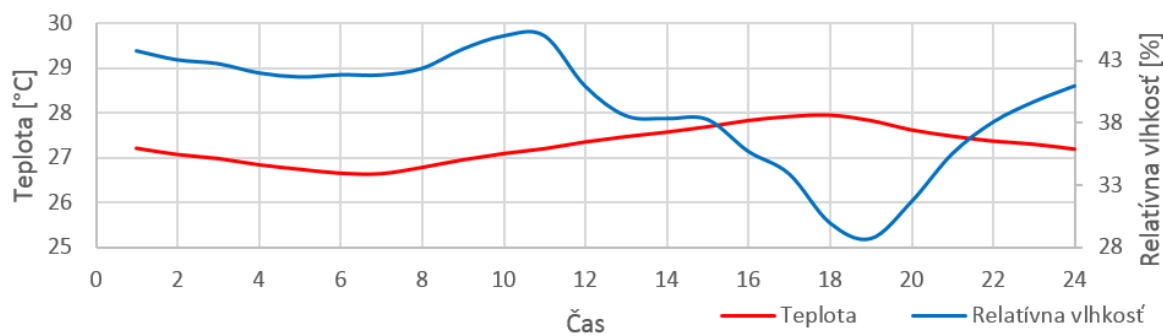
Obr. 4.21: Miestnosť posudzovaná v zimnom aj letnom období (Bedroom, 1st floor)



Obr. 4.22: Energetická bilancia internátu, súčasný stav



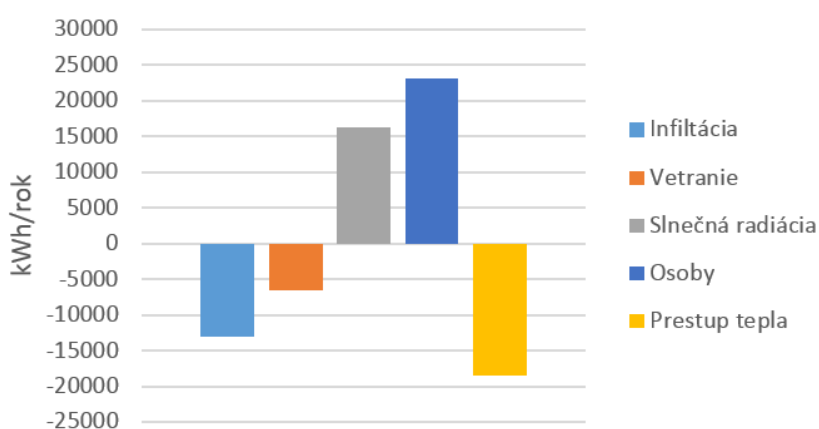
Obr. 4.23: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti v miestnosti, zimné obdobie



Obr. 4.24: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti v miestnosti, letné obdobie

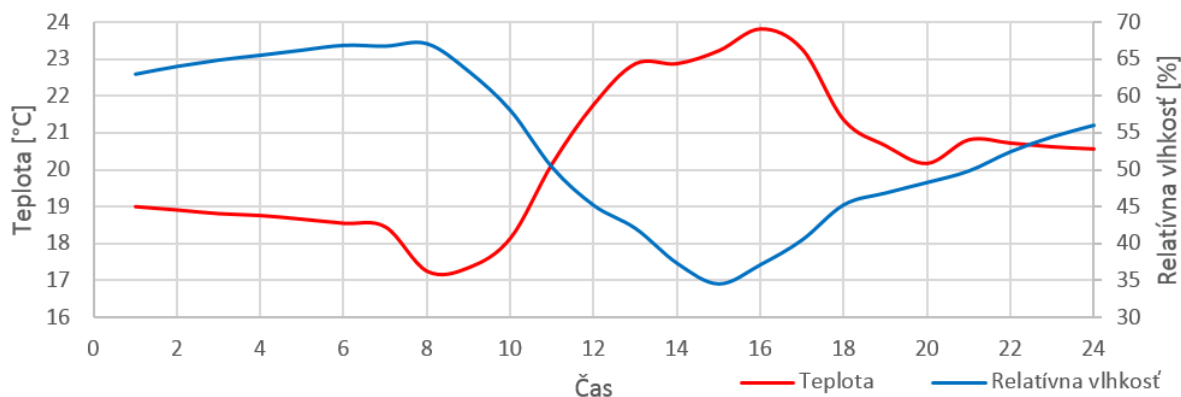
4.2.2 Obsadenosť osobami

Uvažovaný režim pohybu osôb v budove je popísaný v kap. 2.2.2. Vetrание bolo opäť uvažované pri koncentrácii CO_2 rovnej 3000 ppm. Zaujímavou je hlavne miestnosť „Activity Hall“ v ktorej sa pohybuje väčšie množstvo osôb so zvýšenou fyzickou aktivitou vo večerných hodinách. Celkovú energetickú bilanciu znázorňuje nasledujúci obrázok. Možno pozorovať vyše dvojnásobnú tepelnú stratu prestupom tepla a zvýšenú tepelnú stratu infiltráciou vzduchu, a to vplyvom vyššej teploty vnútorného vzduchu a tým pádom vyššieho teplotného gradientu medzi vonkajším a vnútorným vzduchom. Keďže budova internátu vykazuje lepšiu tepelnú stabilitu, majú na vnútorné prostredie najväčší vplyv osoby. Celková ročná potreba tepla je 38 MWh, tepelný zisk osôb bol vypočítaný na 23 MWh za rok. Zisk slnečnou radiáciou ostáva samozrejme nemenný 16 MWh za rok. Do výpočtu týchto ziskov boli zahrnuté aj slnolamy, ktoré obmedzujú tepelné zisky od slnka hlavne v letných mesiacoch, kedy je výška slnka nad obzorom najväčšia.



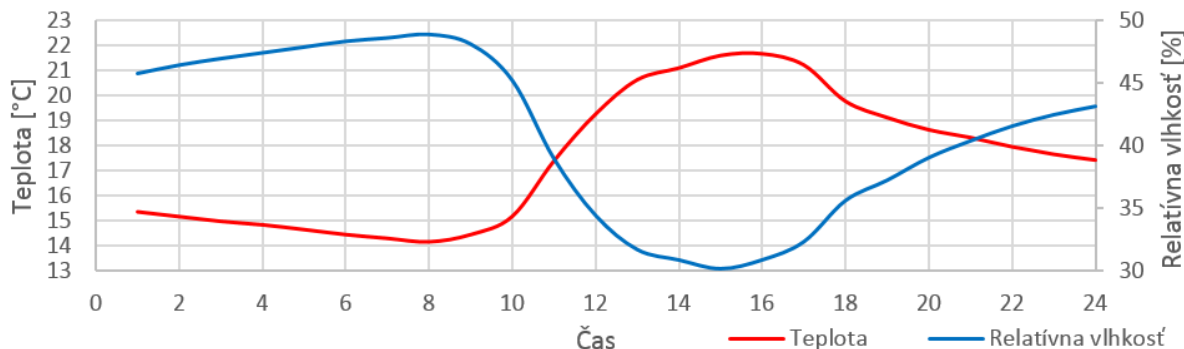
Obr. 4.25: Ročná energetická bilancia pri uvažovaní vplyvu osôb

Na obr. 4.26 je zobrazený priebeh teploty vnútorného vzduchu počas zimného dňa. Oproti hodnotám na obr. 4.23 sú teploty podstatne vyššie v dôsledku tepelného výdaja osôb. Uvažuje sa vetrание od koncentrácie CO_2 3000 ppm a mimo nočných hodín. V čase od ôsmej do tretej sledujeme rapídny pokles relatívnej vlhkosti, keďže v budove sa v tom čase nenachádzajú žiadne osoby. Nárast teplôt spôsobujú zisky od slnečnej radiácie. Osoby teda v zime pomáhajú udržiavať teplotu miestnosti na prijateľných hodnotách počas noci, pričom cez deň sa vyššie teploty udržiavajú vďaka slnečnej radiácii.



Obr. 4.26: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, zimné obdobie (Bedroom – 1st floor)

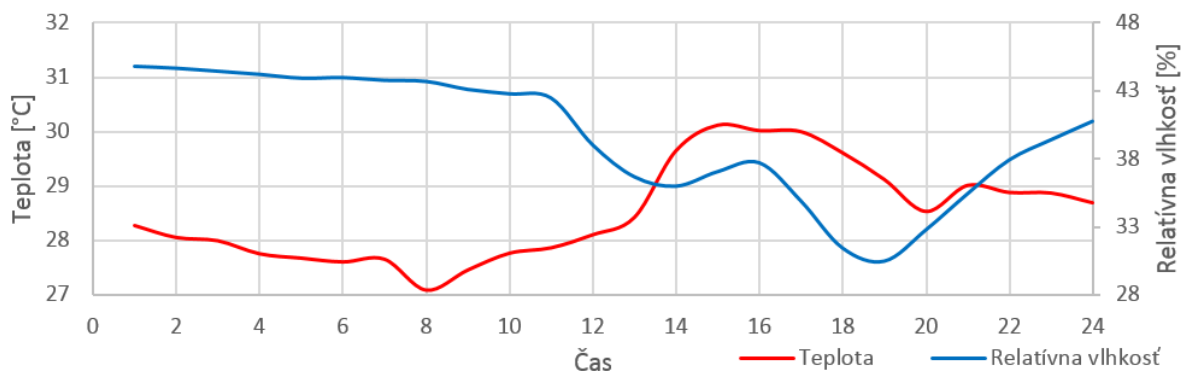
Predchádzajúci graf ukazuje priebeh teplôt v najchladnejšej miestnosti. Ako však ukazuje nasledujúci graf, vplyvom tepelného výdaja osôb v nej dosahujú teploty vyšších hodnôt, než je tomu v prípade miestnosti označenej ako najteplejšia (Bedroom – ground floor), nakoľko tá je určená len pre správcu internátu a teda sa tu pohybuje len jedna osoba. Graf priebehu teplôt a vlhkostí v tejto miestnosti počas zimného dňa je na obr. 4.27. Je vidieť, že teploty dosahujú nižších hodnôt ako v prípade miestnosti na poschodí. Taktiež relatívne vlhkosti sú nižšie.



Obr. 4.27: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, zimné obdobie (Bedroom – ground floor)

V lete dochádza pri plnej obsadenosti a vysokých vonkajších teplotách k prehrievaniu interiéru, ako vyplýva z obr. 4.28. V ranných hodinách dochádza k ochladeniu a zníženiu relatívnej vlhkosti vplyvom otvorenia okien, priestor sa potom ohrieva vďaka slnečnému žiareniu. K ďalšiemu vetraniu dochádza po príchode žiakov zo školy o 16:00, kedy pociťujú zvýšenú teplotu a potrebu vyvetrať. K nárastu teploty znovu dochádza vo večerných hodinách, kedy sa žiáci vracajú z miestnosti „Activity hall“ do izieb. Rastie teplota a zároveň relatívna vlhkosť. Po otvorení okien teplota opäť klesá.

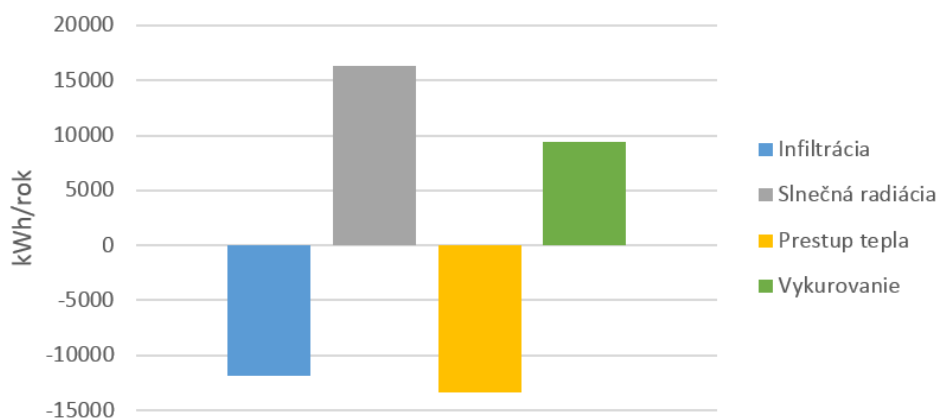
Táto simulácia však nekorešponduje s nameranou skutočnosťou, a to hlavne z dôvodu odlišných okrajových podmienok v meste Srinagar. Možno očakávať, že aj napriek plnej obsadenosti osobami budú parametre vnútorného vzduchu prijateľnejšie a hranicu 30 °C pravdepodobne neprekročia. Z grafu 3.17 totiž vidieť, že teploty exteriéru klesajú počas noci na hodnoty pod 20 °C, neustálym vetraním hlavne v noci teda možno teploty znížiť. Pri ponechaní otvorených okien bude teplota interiéru a exteriéru takmer rovnaká a relatívna vlhkosť bude závisieť hlavne na prítomnosti žiakov v miestnosti.



Obr. 4.28: Priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, letné obdobie (Bedroom – 1st floor)

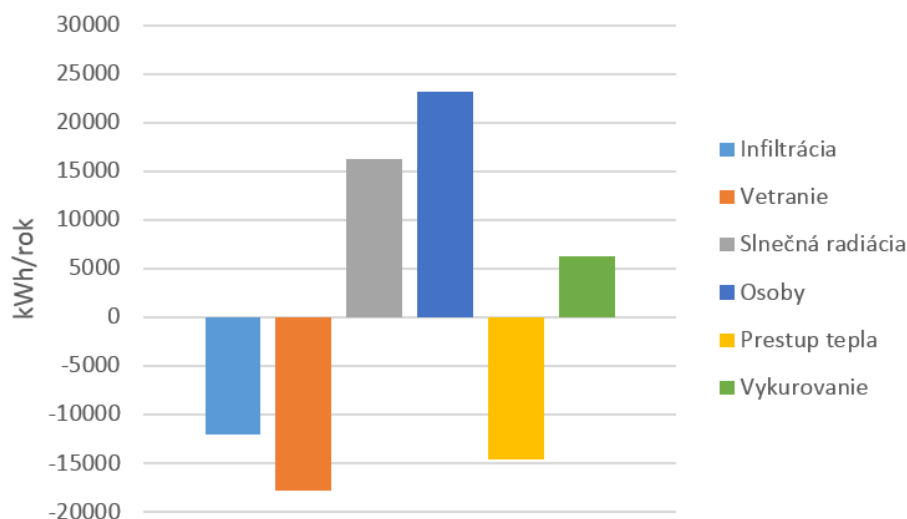
4.2.3 Výpočet potrebného výkonu zdroja

Opäť bude najskôr uvažovaná konštantná teplota 19,5 °C bez vplyvu osôb a so započítaním vplyvu osôb. Následne bude uvažovaná teplota vzduchu 13 °C (PPD = 20 %) a výsledky budú porovnané navzájom. Chodby, priestor so schodiskom a zádverie sa uvažovali ako nevýkurovaný priestor. Pri simulácii bez osôb a vetrania potrebujeme na udržanie stálej teploty vzduchu 19,5 °C dodatočný zdroj tepla o výkonu aspoň 8,8 kW, čo je oproti budove školy menej ako tretinový výkon. Ročná energetická bilancia pre tento prípad je na obr. 4.29. Celková ročná potreba tepla je vyše 25 MWh, pričom slnečná radiácia dodá za rok 16,3 MWh. Zvyšných 9 MWh musí pokryť navrhnutý zdroj tepla.



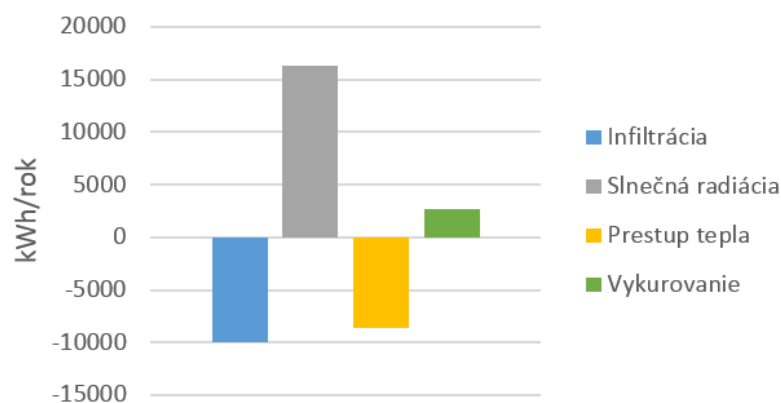
Obr. 4.29: Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 19,5 °C bez vplyvu osôb a vetrania

Na pokrytie tepelných strát pri uvažovaní tepelných výdajov osôb a tepelných strát vetraním pri stálej teplote vnútorného vzduchu 19,5 °C bude opäť potrebný výkon 8,8 kW. Avšak ročný výdaj tohto zdroja bude len 6,3 MWh. Pri uvažovaní ceny elektrickej energie 5 INR za 1 kWh sú ročné náklady na dodávku tohto tepla cca 32 000 INR, čo je v prepočtu necelých 10 000 Kč. Energetická bilancia pre tento prípad je na nasledujúcom obrázku.

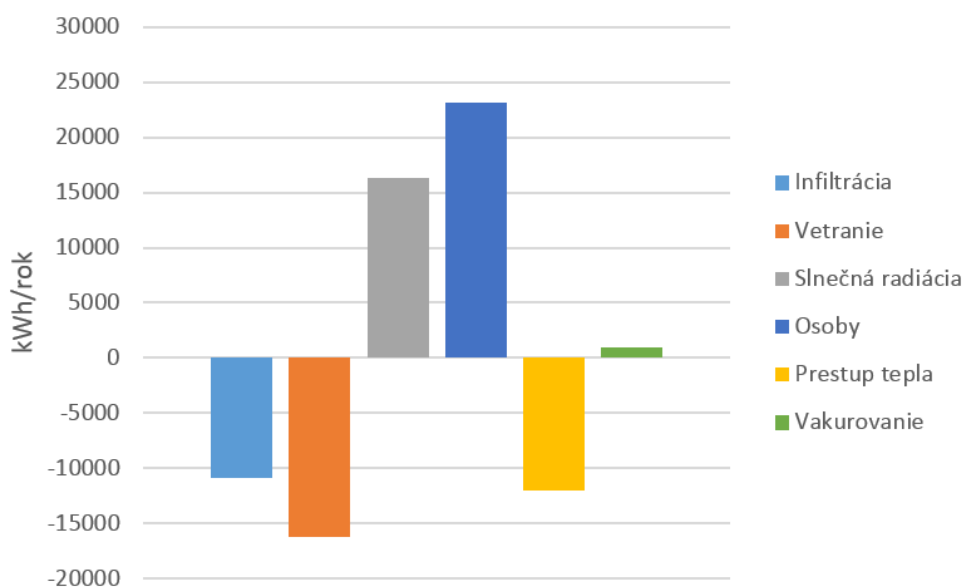


Obr. 4.30: Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 19,5 °C pri uvažovaní vplyvu osôb a vetrania

Ak by sme chceli udržať stálu teplotu v internáte aspoň 13 °C a pokryť tým obdobie s najnižšími teplotami, postačí výkon zdroja tepla 6,2 kW. V takomto prípade je celková ročná potreba tepla len 18,7 MWh. Oproti obr. 4.22 je hodnota vyššia o 2,7 MWh. To je ročná potreba tepla, ktorú musí dodať alternatívny zdroj tepla, aby bolo udržané percento nespokojných osôb PPD = max. 20 %. Energetická bilancia je na obr. 4.31. Energetická bilancia pri uvažovaní tepelného výdaja osôb a tepelných strát vetraním je na obr. 4.32. V tomto prípade postačí výkon zdroja len 5,6 kW a jeho ročný tepelný výdaj bude necelých 1 MWh.



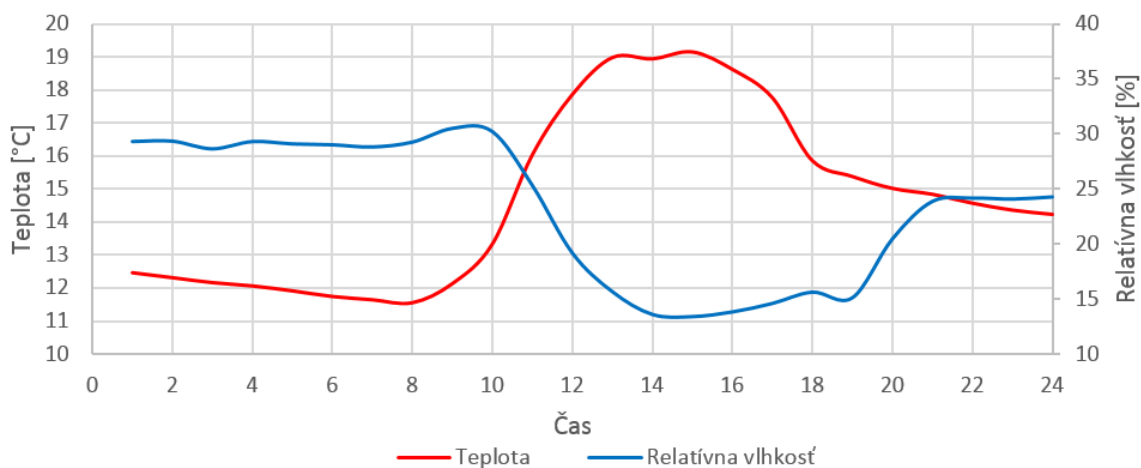
Obr. 4.31: Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 13 °C bez uvažovania vplyvu osôb a vetrania



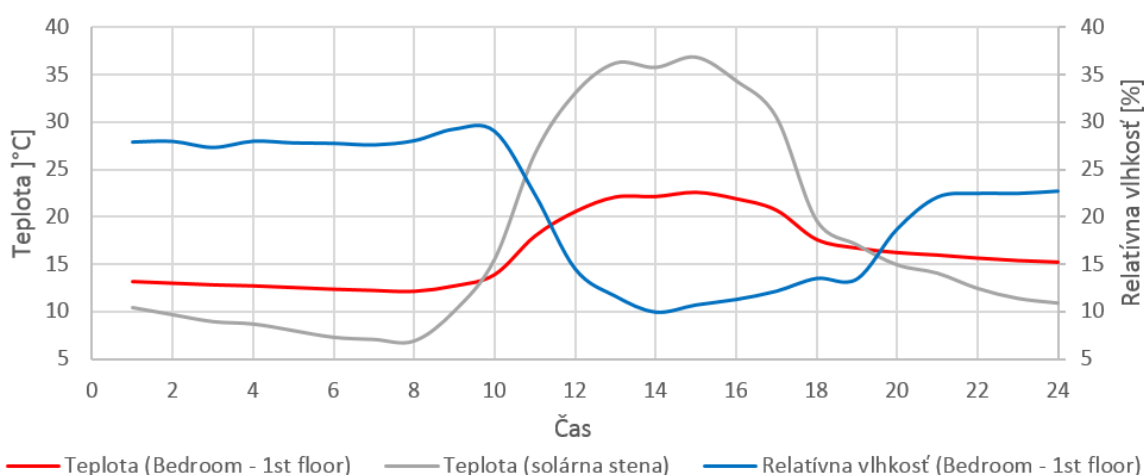
Obr. 4.32: Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 13 °C a uvažovaní vplyvu osôb a vetrania

4.2.4 Využitie tepla zo solárnej steny

Z grafu na obr. 3.20 vidieť, že priestor solárnej steny sa v slnečných dňoch ohrieva na vysoké teploty. Toto teplo sa však nijak nevyužije a vo večerných hodinách uniká netesnosťami a prestupom tepla preč do exteriéru. V zimných mesiacoch by sa pritom dalo využiť napr. na zvyšovanie teploty vnútorného vzduchu. Nasledujúce grafy ukazujú priebeh vnútornej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti „Bedroom – 1st floor“ v zimnom. Obr. 4.33 ukazuje priebeh teplôt bez uvažovaného premiešavania. Obr. 4.34 zobrazuje graf s priebehom teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti pri uvažovanom premiešavaní vzduchu so vzduchom v priestore medzi stenou a sklom. Bol uvažovaný ventilátor s prietokom 100 m³/h a zapínacou teplotou 20 °C. Termostat je osadený v priestore solárnej steny. Minimálna teplota v ranných hodinách sa zvýšila o 2 °C a v priebehu dňa stúpili teploty oproti variante bez premiešavania vzduchu o takmer 4 °C. V simulácii je pritom uvažovaná teplota v solárnej stene nižšia oproti nameraným hodnotám. V prípade internátu v Mulbekhu možno teda očakávať ešte priaznivejšie hodnoty.



Obr. 4.33: Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti bez využitia tepla zo solárnej steny



Obr. 4.34: Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti s využitím tepla zo solárnej steny

5 Záver

Cieľom diplomovej práce bolo zhodnotiť vnútorné prostredie v školskom komplexu nachádzajúcom sa v atypickom himalájskom vysokohorskom prostredí a prípadne navrhnúť vhodné riešenie zlepšenia nevyhovujúceho stavu. Z každej kapitoly plynú závery, ktoré sú zhrnuté v nasledujúcich riadkoch.

Vyhodnotenie súčasného stavu

Na základe meraní bolo zistené, že budovy nesplňujú požiadavky českej legislatívy a vo väčšine prípadov nesplňujú ani požiadavky stanovené na základe predpokladaného percenta nespokojných ľudí. Napriek tomu možno povedať, že v porovnaní s ostatnými školami v tejto oblasti, čo sa týka teploty a relatívnej vlhkosti, je vnútorné prostredie v škole aj v internáte na veľmi dobrej úrovni. Teploty sa dostávajú mimo prijateľné hodnoty len v najmrazivejších, alebo najteplejších dňoch. Budova školského internátu vykazuje lepšiu tepelnú stabilitu ako budova školy, avšak v budove školy stúpa v priebehu dňa teplota vzduchu na vyššie hodnoty. V lete dochádza k nadmernému prehrievaniu len pri extrémnych teplotách exteriéru. Obidve budovy teda splňujú všetky očakávania, aj keď z hľadiska legislatívy je vnútorné prostredie nevyhovujúce.

Meraním bolo potvrdené očakávanie, že solárny komín bude účinnejší v prípade transparentného povrchu zo skla ako pri použití vlnitého plechu. Na základe priebehu teplôt v jednotlivých bodoch solárneho komína sa zistilo, že odvetranie nie je úplne vyhovujúce. Miestni obyvatelia potvrdili, že vzduch prúdi skôr do miestnosti ako do komína. To je spôsobené pravdepodobne malou prierezovou plochou otvorov v ústí komína. Riešením by mohlo byť zakrývanie otvoru záchodu alebo zväčšenie prierezovej plochy otvorov na odvetranie.

V priestore solárnej steny stúpajú povrchové teploty až nad 60 °C, pričom maxima dosahujú v poobedňajších hodinách. Na vnútornom povrchu boli namerané maximálne teploty okolo deviatej hodiny večer, fázový posun teplotného kmitu je teda cca 7 hodín.

Vyhodnotenie na základe simulácií

Boli vytvorené modely školy aj školského internátu, na ktorých boli simulované rôzne stavy prevádzky a boli sledované hlavne energetické zmeny a taktiež zmeny teplôt. Možno očakávať, že za plnej prevádzky budú teploty vzduchu vplyvom tepelných ziskov od vnútorných zdrojov prijateľnejšie. Škola vykazuje veľké tepelné straty prestupom tepla, v budove internátu naopak dochádza k najväčším tepelným stratám vplyvom vetrania. Na straty prestupom tepla má najväčší vplyv presklená plocha, preto je zbytočné uvažovať o dodatočnom zateplení objektov.

Boli navrhnuté potrebné výkony dodatočných zdrojov tepla tak, aby bola udržaná prijateľná teplota vnútorného vzduchu. Ukázalo sa, že škola potrebuje omnoho vyšší výkon zdroja a náklady na jej prevádzku v prípade udržiavania stálej teploty 19 °C by boli neúnosné. Hlavným dôvodom je veľký pokles teploty vnútorného vzduchu v nočných hodinách vplyvom veľkej presklennej plochy. Naproti tomu budova internátu vykazuje malé tepelné straty a na dosiahnutie stálej teploty 19 °C postačí oproti škole len tretinový výkon. Ročné náklady na jeho prevádzku sú oproti škole omnoho nižšie a prijateľné aj z ekonomického hľadiska.

Veľký potenciál má priestor solárnej steny medzi povrchom a sklom. Meranie ukázalo, že v priebehu dňa tu vzniká veľké množstvo odpadného tepla, ktoré nie je nijak využívané. Simulácie ukazujú, že využitím tohto tepla v slnečných dňoch možno zvýšiť teplotu vnútorného vzduchu a vďaka dobrej tepelnej stabilite sú potom vyššie aj teploty vzduchu v nočných hodinách.

V budove školy je teda reálne, avšak neekonomické zlepšiť stav prostredia tak, aby vyhovoval všetkým požiadavkám. V budove internátu možno odporučiť uvažovať o zlepšení stavu vnútorného prostredia napr. vhodným alternatívnym zdrojom tepla, ktorý by v kombinácii s využitím energie z priestoru solárnej steny dokázal udržať teploty vzduchu na prijateľných hodnotách aj v najmrazivejších dňoch. Okrem ekonomického hľadiska treba však spomenúť, že v oblasti je veľký nedostatok zdrojov energie. Jedinou energiou, ktorej je tu dostatok, je práve slnečná energia, ktorú sa preto treba snažiť čo najefektívnejšie využívať. Alternatívou k slnečnej energii v zamračených dňoch je elektrická energia. Nakoľko je škola blízko distribučnej siete, bolo by vhodné uvažovať o využití elektrickej energie ako zdroja tepla.

V práci sú zhrnuté len najpodstatnejšie namerané hodnoty a výsledky simulácií. Na priloženom CD je súbor s nameranými hodnotami v prehľadnom formáte. Tie môžu poslúžiť ako podklad pre ďalší rozbor, napr. pre modelovanie prirodzeného vetrania a pod. Každý, kto bude túto prácu držať v rukách, si môže navyše utvoriť obraz o podmienkach v oblasti Kašmíru, čo považujem za ďalší prínos tejto diplomovej práce. Najväčší prínos má však táto práca pre mňa, ako autora práce. Okrem poznatkov, ktoré som získal štúdiom danej problematiky, ma samotný pobyt v Kašmíru kultúrne aj morálne obohatil.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] *Škola v Mulbekhu* [online], [vid. 24.12.2016]. Dostupné z: <http://www.brontosaurivhi-malajich.cz/skola-v-mulbekhu>
- [2] *Srinagar, Jammu and Kashmir Monthly Climate Average, India* [online], [vid. 24.12.2016]. Dostupné z: <https://www.worldweatheronline.com/srinagar-weather-averages/jammu-and-kashmir/in.aspx>
- [3] *Měsíční data* [online], [vid. 24.12.2016]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data#>
- [4] Vyhl. č. 410/2005 Sb. ve znění vyhl. č. 343/2009 Sb. – *O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*; 9.2009
- [5] Vyhl. č. 6/2003 Sb. – *Kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb*; 12.2002
- [6] HAIYAN YAN, LIU YANG: *Indoor Thermal Conditions and Thermal Comfort in Residential Buildings during the Winter in Lhasa, China*, 8th Windsor Conference, 04.2014, Windsor, United Kingdom
- [7] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: *Thermal environmental conditions for human occupancy*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta; 2004
- [8] FANGER P.O.: *Thermal Comfort*; 1970
- [9] HREBÍK P., MATIAŠOVSKÝ P.: *Analýza neurčitosti vnútornej teploty výpočtu potreby tepla na vykurovanie*; 2014 [online]; [vid. 26.12.2016]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/10871-analyza-neurcitosti-vnutornej-teploty-vypoctu-potreby-tepla-na-vykurovanie>
- [10] *Katalog stavebních materiálů* [online], [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html
- [11] *Vlastnosti hlíny ako stavebného materiálu*; 01.2010 [online], [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: <http://www.klasici.sk/node/404>
- [12] KARASOVÁ A.: *Kvantifikace mechanických a tepelně fyzikálních vlastností hlíny*; [online]; [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: http://www.hlina.info/media/doc/22_karaso-va.pdf
- [13] *Základní vlastnosti slaměných balíků*; 2013; [online]; [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: <http://www.sdruzeni-ekodum.cz/zakladni-vlastnosti-slamenych-baliku>
- [14] *Fyzikální vlastnosti izolace ze slaměných balíků a jejich úprava pro pasivní domy*; 2005; [online]; [vid. 27.12.2016]. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/jenik/pasiv/slama/aquath_05.htm
- [15] ČSN 73 0542 – *Způsob stanovení energetické bilance zasklených ploch obvodového pláště budov*; 9.1995
- [16] ČSN 73 0540 – *Tepelná ochrana budov – část 3*; 10.2011
- [17] INSTITUTE FOR MATHEMATICAL MODELLING: *Solving systems of linear equations (in Danish) (Løsning af lineære lignings systemer)*. Folder 23. Technical University of Denmark, Lyngby, DENMARK. 1972

- [18] PETERSEN E.: *Solar radiation and daylight, measured and calculated (In Danish) (Solstråling og dagslys, -målt og beregnet)*. Report 34. Light Technique Laboratory, Lyngby, DENMARK. 1982
- [19] MUNEER T.: *Algorithms for estimating hourly solar irradiation on slopes*. Journal of Building Services, Engineering, Research and Technology 10(2). 1989
- [20] LUND H.: *Revised splitting procedure for calculation of direct normal radiation and diffuse radiation*. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, DENMARK. 1979
- [21] Nápoveda programu BSim
- [22] *Wheather Data for Energy Calculations, India – IND*; [online]; [vid. 20.9.2016]. Dostupné z: <http://weather.whiteboxtechnologies.com/ISHRAE>
- [23] *Srinagar, Jammu And Kashmir Climate and Temperatures*; [online]; [vid. 2.1.2017]. Dostupné z: <http://www.srinagar.climatemps.com/>

7 Zoznam tabuliek

Tab. 1.1 Skladby stavebných konštrukcií

Tab. 2.1 Výpis inštalovanej meracej techniky

Tab. 2.2 Fyzikálne vlastnosti použitých stavebných materiálov

8 Zoznam obrázkov

- Obr. 1.1 Poloha dediny Mulbekh*
- Obr. 1.2 Priemerné mesačné teploty pre mesto Srinagar*
- Obr. 1.3 Priemerný mesačný úhrn zrážok a počet zrážkových dní, Srinagar*
- Obr. 1.4 Priemerné mesačné teploty pre ČR*
- Obr. 1.5 Priemerný mesačný úhrn zrážok a počet zrážkových dní, ČR*
- Obr. 1.6 Princíp vykurovania interiéru školského internátu solárnou stenou*
- Obr. 1.7 Budova školského internátu*
- Obr. 1.8 Budova školy*
- Obr. 1.9 Princíp ohrevu a vetrania toaliet*
- Obr. 1.10 Lineárna regresia založená na závislosti AMV na teplote vzduchu*
- Obr. 1.11 Predpokladané percento nespokojných v závislosti na teplote vzduchu*
- Obr. 2.1 Použitá meracia technika*
- Obr. 2.2 Inštalácia čidiel na strop*
- Obr. 2.3 Umiestnenie čočky luxmetra na meranie zvislej osvetlenosti*
- Obr. 2.4 Rozmiestnenie čidiel v budove školy*
- Obr. 2.5 Rozmiestnenie čidiel v budove školského internátu*
- Obr. 2.6 Schematické znázornenie merania priebehu povrchových teplôt*
- Obr. 2.7 Meranie povrchových teplôt*
- Obr. 2.8 Objekt záchodov*
- Obr. 2.9 Objekt s vylepšeným priestorom s kompostom*
- Obr. 2.10 Tradičný záchod s vylepšeným odvetraním priestoru s kompostom*
- Obr. 2.11 Rozloženie konštrukcie na kontrolné objemy a poloha uzlových bodov*
- Obr. 2.12 3D model budovy školy*
- Obr. 2.13 3D model školského internátu*
- Obr. 3.1 Priemerné mesačné teploty*
- Obr. 3.2 Priemerná vonkajšia relatívna vlhkosť*
- Obr. 3.3 Priemerné vonkajšie denné teploty a relatívne vlhkosti v januári 2016*
- Obr. 3.4 Priemerná vonkajšia teplota a relatívna vlhkosť v letnom období 2016*
- Obr. 3.5 Priemerné teploty a relatívne vlhkosti vzduchu interiéru v januári*
- Obr. 3.6 Priebeh vnútorných teplôt vzduchu v internáte, 19.1.2016*
- Obr. 3.7 Priebeh vnútorných teplôt vzduchu v budove školy, 19.1.2016*
- Obr. 3.8 Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v najchladnejšej učebni*
- Obr. 3.9 Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Activity Hall, december – február*
- Obr. 3.10 Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Bedroom (1st floor), december – február*
- Obr. 3.11 Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Middle classroom, december – február*
- Obr. 3.12 Histogramy teplôt a relatívnych vlhkostí, Corner classroom, december – február*
- Obr. 3.13 Závislosť vnútorných teplôt vzduchu na slnečnom žiarení*
- Obr. 3.14 Priebeh priemerných denných teplôt a relatívnych vlhkostí v letnom období*
- Obr. 3.15 Priebeh teplôt vzduchu v internáte, 2.7.2016*
- Obr. 3.16 Priebeh teplôt vzduchu v škole, 2.7.2016*
- Obr. 3.17 Priebeh vnútornej a vonkajšej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, 2.7.2016*
- Obr. 3.18 Histogramy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, Bedroom – 1st floor, leto*

- Obr. 3.19 *Histogramy teploty a relativnej vlhkosti vzduchu, Middle classroom – 1st floor, letné obdobie*
- Obr. 3.20 *Priebeh povrchových teplôt v solárnej stene*
- Obr. 3.21 *Priebeh teplôt a relativnej vlhkosti v záchode „European toilet“*
- Obr. 3.22 *Priebeh teplôt v záchode „Traditional toilet“*
- Obr. 3.23 *Malá prierezová plocha otvoru na odvod odpadného vzduchu*
- Obr. 4.1 *Priebeh teplôt vzduchu v škole v chladnom dni*
- Obr. 4.2 *Percentuálne zastúpenie teplôt vnútorného vzduchu školy*
- Obr. 4.3 *Simulácia priebehu vonkajšej teploty a relativnej vlhkosti, január*
- Obr. 4.4 *Simulácia priebehu vonkajšej teploty a relativnej vlhkosti, júl*
- Obr. 4.5 *Energetická bilancia školy, súčasný stav*
- Obr. 4.6 *Učebňa posudzovaná v zimnom období (Corner classroom, 1st floor)*
- Obr. 4.7 *Učebňa posudzovaná v letnom období (Middle classroom, 1st floor)*
- Obr. 4.8 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti, zimné obdobie*
- Obr. 4.9 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti, letné obdobie*
- Obr. 4.10 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti v zimnom období pri uvažovaní vplyvu osôb*
- Obr. 4.11 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti v letnom období pri uvažovaní vplyvu osôb*
- Obr. 4.12 *Energetická bilancia pri uvažovaní vplyvu osôb*
- Obr. 4.13 *Energetická bilancia pri uvažovaní ďalšieho zdroja tepla a vplyvu osôb*
- Obr. 4.14 *Energetická bilancia pri uvažovaní ďalšieho zdroja tepla bez vplyvu osôb*
- Obr. 4.15 *Energetická bilancia pri uvažovaní teploty 13 °C bez vplyvu osôb*
- Obr. 4.16 *Energetická bilancia pri uvažovaní teploty 13 °C a vplyvu osôb*
- Obr. 4.17 *Priebeh teplôt v internáte v chladnom dni*
- Obr. 4.18 *Percentuálne zastúpenie teplôt vnútorného vzduchu internátu v zimnom a letnom období*
- Obr. 4.19 *Miestnosť „Activity Hall“*
- Obr. 4.20 *Miestnosť posudzovaná v letnom období (Bedroom, ground floor)*
- Obr. 4.21 *Miestnosť posudzovaná v zimnom aj letnom období (Bedroom, 1st floor)*
- Obr. 4.22 *Energetická bilancia internátu, súčasný stav*
- Obr. 4.23 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti v miestnosti, zimné obdobie*
- Obr. 4.24 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti v miestnosti, letné obdobie*
- Obr. 4.25 *Ročná energetická bilancia pri uvažovaní vplyvu osôb*
- Obr. 4.26 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, zimné obdobie (Bedroom – 1st floor)*
- Obr. 4.27 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, zimné obdobie (Bedroom – ground floor)*
- Obr. 4.28 *Priebeh vnútornej teploty a relativnej vlhkosti pri uvažovaní vplyvu osôb, letné obdobie (Bedroom – 1st floor)*
- Obr. 4.29 *Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 19,5 °C bez vplyvu osôb a vetrania*
- Obr. 4.30 *Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 19,5 °C pri uvažovaní vplyvu osôb a vetrania*

- Obr. 4.31 Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 13 °C bez uvažovania vplyvu osôb a vetrania*
- Obr. 4.32 Energetická bilancia pri udržiavaní stálej vnútornej teploty 13 °C a uvažovaní vplyvu osôb a vetrania*
- Obr. 4.33 Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti bez využitia tepla zo solárnej steny*
- Obr. 4.34 Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti s využitím tepla zo solárnej steny*

9 Zoznam príloh

- P1 Pôdorysy podlaží školy
- P2 Pôdorysy podlaží internátu
- P3 Zvislý rez internátom
- P4 Zvislý rez kompostujúcim záchodom
- P5 Členenie fasády záchodu
- P6 Namerané dáta (CD)